

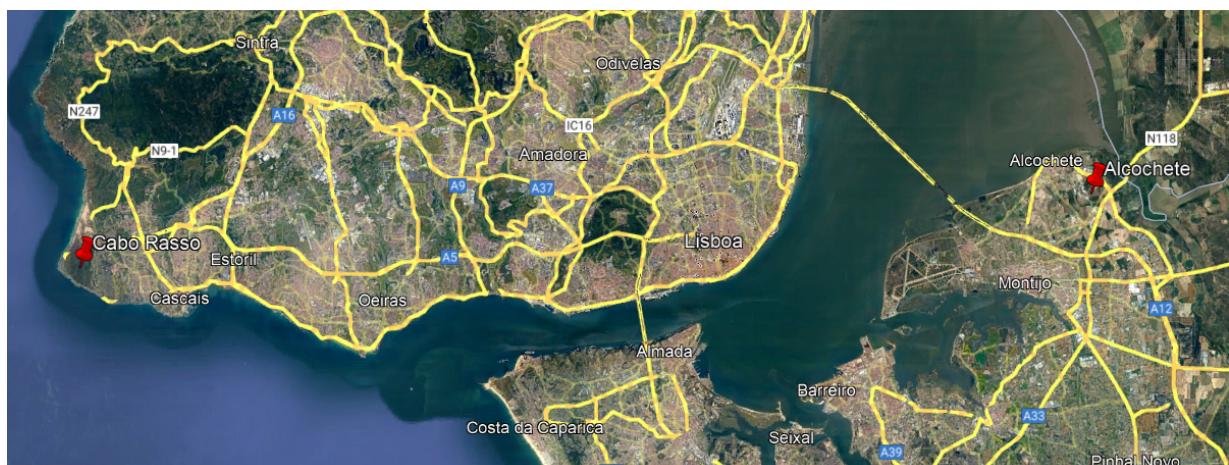


TÉCNICO LISBOA

MEEC

Sistemas de Telecomunicações Via Rádio

Ligaçāo Cabo Rasso - Alcochete



Autores:

Franisco Matias - 99936
Hugo Rabuge - 99959

francisco.m.matias@tecnico.ulisboa.pt
hugo.rabuge@tecnico.ulisboa.pt

Grupo 13

2023/2024 – 1º Semestre, P2

Conteúdo

1	Introdução	3
1.1	Diretrizes do Projeto	3
1.1.1	Análise técnica e operacional do Projeto	3
1.1.2	Análise financeira do Projeto	3
2	Parâmetros utilizados/calculados	4
2.1	Frequências de Trabalho	4
2.1.1	Percursos em estudo e respetivas topografias	5
2.1.2	Terra Plana	6
2.1.3	Terra Esférica	7
2.2	Atenuações ao longo dos Percursos	7
2.2.1	Atenuação Atmosférica	7
2.2.2	Atenuação devido a Hidrometeoritos	8
2.2.3	Atenuação dos Guias	10
2.2.4	Atenuação devido a Obstáculos	10
2.2.5	Desvanecimento rápido	10
2.2.6	Reflexões no terreno	10
2.2.7	Potência de Emissão e Recepção	11
3	Feixes Hertzianos Digitais	12
3.1	Sinal Digital e Largura de Banda em rádio-freqüência	12
3.2	Modulação da Portadora	13
3.3	Fiabilidade do Equipamento	13
3.4	Relação Portadora/ruído em rádio-freqüência	14
3.5	Recomendações da ITU	15
3.6	Margens	15
3.6.1	Margem de segurança	15
3.6.2	Margem Uniforme	17
3.6.3	Margem Seletiva	17
3.6.4	Margem Crítica	18
3.7	Igualação e Desvanecimento seletivo	19
3.8	Diversidade	19
3.9	Guia de Ondas	20
4	Análise técnica e Operacional dos Percursos	21
4.1	Características dos Mastros e Antenas	21
4.1.1	Altura dos mastros	21
4.1.2	Coordenadas Geográficas das Antenas e Altitudes dos mastros	21
4.1.3	Azimutes e ângulos de fogo	21
4.2	Repetidores	22
4.2.1	Repetidor Passivo	22
4.2.2	Repetidor Ativo	23
4.2.3	Escolha do repetidor	23
5	Análise financeira dos Percursos	24
5.1	Caminho Via Serra de Sintra, com repetidor ativo	25
5.1.1	Custos do equipamento usado	25
5.2	Caminho Via Monsanto, com repetidor ativo	25
5.2.1	Custos do equipamento usado	25
5.3	Percorso escolhido	25
5.4	Panorama Final	25
5.4.1	Custos de Exploração	25
5.4.2	Custo total e custo diário médio	26
5.4.3	Receita	26
5.4.4	Representação gráfica	26
6	Reflexões Finais	27
7	Referências Bibliográficas	28
8	Anexos	29
8.1	Cotas	29
8.2	Feixer	30

1 Introdução

O presente projeto visa estabelecer uma comunicação bidirecional por meio de feixes hertzianos entre as localidades de Cabo Raso e Alcochete. Para atingir esse propósito, vamos utilizar o software *Mathematica*, empregando o script FeixerV315 e integrando informações do Google Earth Pro.

Inicialmente, irão ser definidas as métricas essenciais para a realização do projeto, incluindo a modulação a ser aplicada em cada faixa de frequência de acordo com as diretrizes da ANACOM (Autoridade Nacional de Comunicações). Utilizando o Google Earth Pro, avançaremos com a projeção do local ideal para as antenas terminais e para a estação repetidora. Neste trabalho, analisaremos então dois possíveis percursos a serem usados bem como a possibilidade ou não de serem usados repetidores passivos/ativos.

Posteriormente, através do script FeixerV315, iremos realizar uma análise detalhada da viabilidade da ligação, explorando o elipsóide de Fresnel e avaliando o impacto de reflexões e atenuações na comunicação.

Por fim, temos como objetivo otimizarmeticulamente os parâmetros da ligação, visando minimizar os custos associados ao projeto.

No fundo queremos ver a evolução do custo médio de utilização do sistema para uma chamada telefónica (bidireccional) com a duração de 3 minutos, e, para tal, vamos concentrar-nos na implementação de feixes hertzianos como meio de comunicação entre as duas localidades, destacando a importância da precisão nas métricas, da análise da propagação do sinal e da otimização dos recursos para assegurar uma conexão eficiente e economicamente viável.

1.1 Diretrizes do Projeto

Após uma primeira leitura e interpretação do enunciado do nosso projeto, e tendo em vista o objetivo da criação de uma ligação entre as duas localidades mediante a utilização de feixes hertzianos foram notadas algumas diretrizes importantes que nos guiarão a uma boa execução do projeto, e de forma a orientar-nos vamos enumerá-las neste segmento.

1.1.1 Análise técnica e operacional do Projeto

- Determinar a banda de frequências ótima de entre as previstas pela ITU-R;
- Obter o perfil a partir do Google Earth;
- Valor máximo da potência do emissor, $p_m = \frac{p_0}{f^b}$, com $p_0 = 4$ e $b = 1.2$;
- Fator de ruído do receptor, $F = F_0 + a * f$, com $F_0 = 6$ e $a = 0.2$;
- Analisar a possibilidade/necessidade de recorrer a diversidade;

1.1.2 Análise financeira do Projeto

- Duração do projeto de 25 anos;
- Taxa de utilização anual de acordo com o definido pela ANACOM;
- Valor residual nulo;
- Encargos nulos com terrenos e direitos de passagem;
- Encargos de exploração anuais, iguais a 15% do custo inicial;
- Tráfego médio por canal telefónico, $(0.2 + 0.02 * t_{i[\text{anos}]})$ Erlang;
- Taxa interna de retorno (a preços constantes) de 10%;
- Taxa de inflação de 4%.
- Procurar de entre as diversas configurações possíveis, aquela que conduza ao custo mais baixo;

2 Parâmetros utilizados/calculados

2.1 Frequências de Trabalho

Para a codificação de um sinal de voz usaremos um sistema PCM. Neste tipo de sistemas, o sinal analógico de voz é amostrado em intervalos regulares (geralmente 8.000 amostras por segundo) e cada amostra é quantificada com uma resolução de 8 bits. Daí, resulta que o ritmo necessário para a codificação de um sinal de voz seja de 64 kbit/s ($8000 * 8 = 64$ kbits/s).

Posto isto, e tendo em conta que necessitamos que o feixe suporte 960 canais telefónicos (o que nos leva a um ritmo de $960 * 64 = 61.44$ Mbit/s, 30.72 Mbit/s por cada polarização) podemos classificar o nosso feixe como sendo de hierarquia 3 ou 4:

Hierarquia digital	Ritmo binário (kbit/s)	Hierarquia digital	Número de canais de 64 kbit/s
0	64	1	30
1	2048	2	120
2	8448	3	480
3	34368	4	1920
4	139264		

Tabela 1: Ritmos binários preconizados na recomendação G.702 e número de canais de 64 kbit/s para as hierarquias digitais plesiócronas recomendadas pela ITU-T. A verde estão selecionadas as possíveis hierarquias de serem usadas neste projeto.

Após a interpretação das tabelas acima apresentadas, existirão $480 * 2 = 960$ canais (devido ao duplo sentido de polarização ou utilização de 2 canais radioelétricos diferentes) a um ritmo de sensivelmente 34 Mbit/s por polarização, ou simplesmente 1920 canais (dos quais só serão usados os 960 precisos) a um ritmo a rondar os 140 Mbit/s.

Assim sendo, procuramos bandas de frequência que sejam capazes de transmitir 480 canais a um ritmo mínimo de 34 Mbit/s ou de bandas capazes de transmitir os 960 a um ritmo igual ou superior a 140 Mbit/s.

No entanto, a nossa seleção das bandas de frequência pode ser mais restrita, levando em conta um dos principais objetivos deste projeto: o custo! Desta forma, atendendo a que o aluguer das bandas de frequência à ANACOM depende única e exclusivamente da frequência e da distância de ligação (como veremos mais à frente), e estando cientes que para a implementação de um sistema que envolvesse 2 ligações de feixes hertzianos de 480 canais a um ritmo mínimo de 34 Mbit/s, seria necessário duplicar o equipamento usado (guias e feeders), ficando sempre mais caro (mesmo com os 50% de desconto na tarifa anual da segunda ligação para a opção de 34 Mbit/s), optámos por escolher bandas de frequência que oferecessem um ritmo igual ou superior a 140 Mbit/s.

A seguinte tabela compara as diferentes bandas de frequência de acordo com as recomendações da ITU:

Banda [GHz]	Utilização	ITU	Aplicação
2	Não	F.283-5	Para ritmos de transmissão até 70 Mbit/s
4	Sim	F.382-7	Para ritmos de transmissão de $2*34$, $2*45$ ou 140 Mbit/s
5	Sim	F.1099-3	Para ritmos de transmissão de $4*34$ ou 140 Mbit/s
6	Sim	F.383-6	Para ritmos de transmissão de 140 ou 155 Mbit/s
7	Sim	F.385-6	Para ritmos de transmissão de 34 ou 140 Mbit/s
8	Sim	F.386-6	Para ritmos de transmissão de 90, $2*8$, 34, 140 Mbit/s
10	Não	F.747	Para ritmos de transmissão de 8 Mbit/s
11	Sim	F.387-8	Para ritmos de transmissão de 140 ou 155 Mbit/s
13	Sim	F.497-6	Para ritmos de transmissão de 34, 70, 140 ou 155 Mbit/s
15	Não	F.636-6	Para ritmos de transmissão de 8 ou 34 Mbit/s
18	Sim	F.595-6	Para ritmos de transmissão de 34, 140 ou 280 Mbit/s

Tabela 2: Bandas de frequências possíveis de serem usadas para um sistema digital, e que respeite as nossas necessidades segundo as recomendações da ITU.

Depois da análise da tabela, não teremos em conta a banda dos 2, 10 e 15 GHz ao longo do trabalho, por não satisfazer as necessidades necessárias ao nosso projeto.

2.1.1 Percursos em estudo e respetivas topografias

Para a projeção da ligação que nos foi proposta foi necessário estabelecermos alguns modelos de percursos que possibilitariam o bom funcionamento dessa ligação. Desta forma, procurámos encontrar pontos de maior altitude que fizessem sentido para a projeção da ligação. Assim, entre Cabo Rasso e Alcochete, encontrámos dois possíveis locais onde poderíamos estabelecer repetidores (passivos ou ativos) que de alguma forma garantissem o bom funcionamento do projeto: a Serra de Sintra e Monsanto.

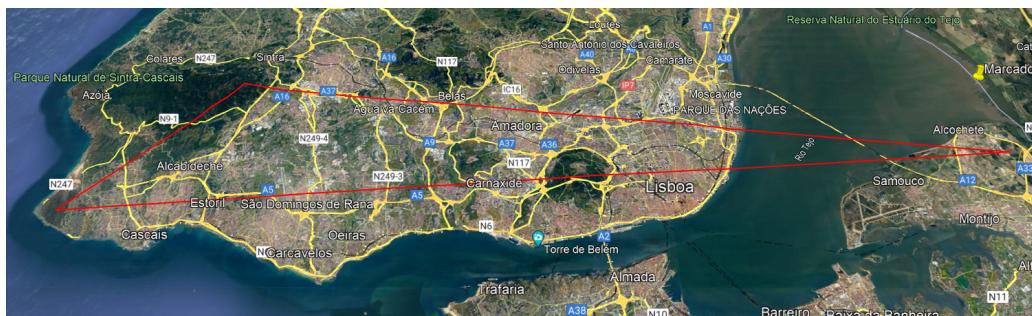
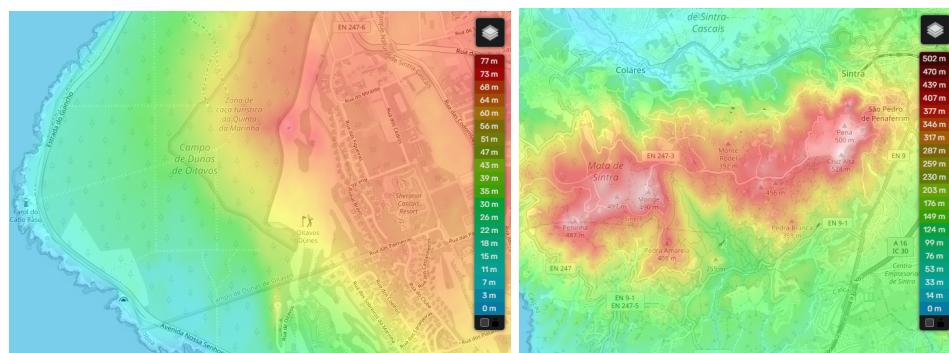
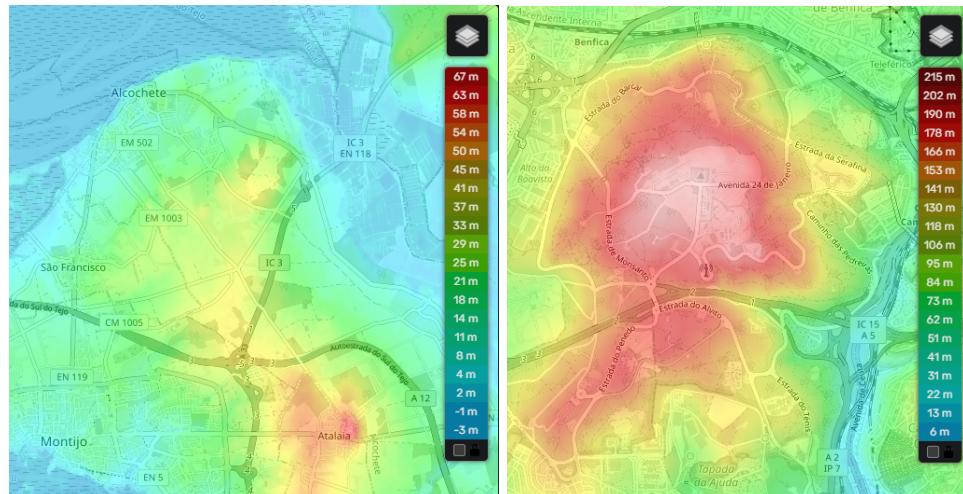


Figura 1: Visão satélite dos troços idealizados.



a) Mapa topográfico Cabo Rasso

b) Mapa topográfico Serra de Sintra

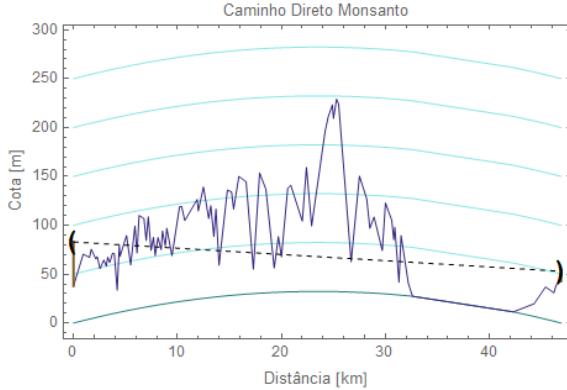


c) Mapa topográfico Alcochete

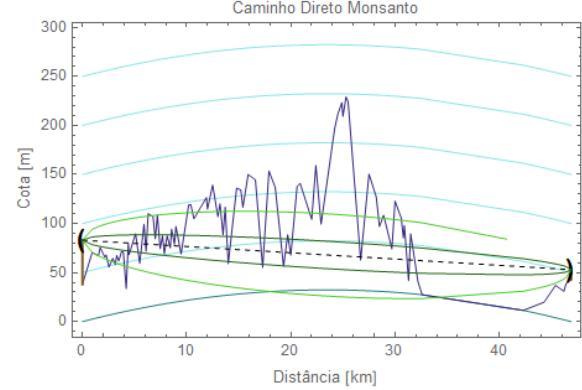
d) Mapa topográfico Monsanto

Figura 2: Mapas de calor das diferentes zonas.

A possibilidade de existir um raio direto entre as localidades de Cabo Rasso e Alcochete não faz qualquer tipo de sentido, visto que assim como se pode constatar nas próximas imagens, não existe linha de vista entre as antenas terminais. Resta-nos a implementação de um repetidor que poderá ser colocado, como vimos, ou em Monsanto ou na Serra de Sintra.



a) Raio direto entre os terminais.



b) 1º Elipsóide de Fresnel

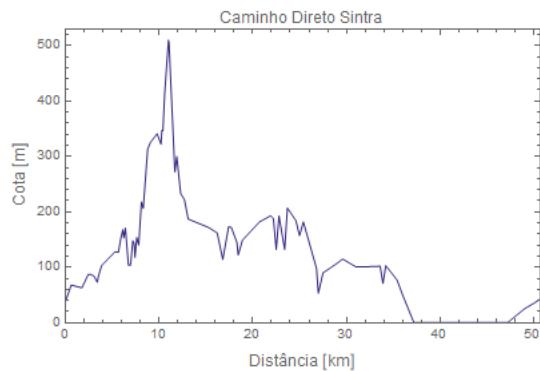
Figura 3: Percurso direto entre Cabo Raso e Alcochete.

Concluindo, os percursos a serem analisados são:

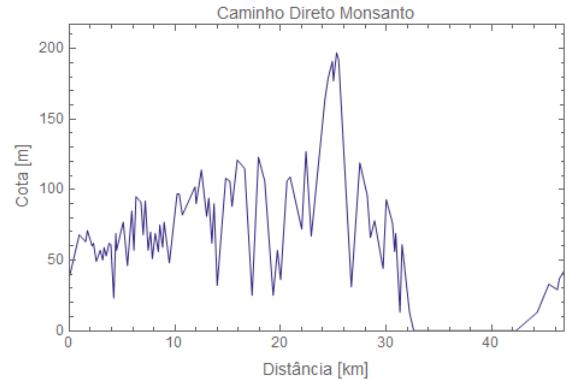
1. Cabo Raso - Serra de Sintra - Alcochete
2. Cabo Raso - Monsanto - Alcochete

2.1.2 Terra Plana

A partir do programa Feixer, e após a extração dos principais pontos dos diferentes percursos, obtivemos os seguintes perfis de ligações:



a) Perfil da ligação passando pela Serra de Sintra



b) Perfil da ligação passando por Monsanto

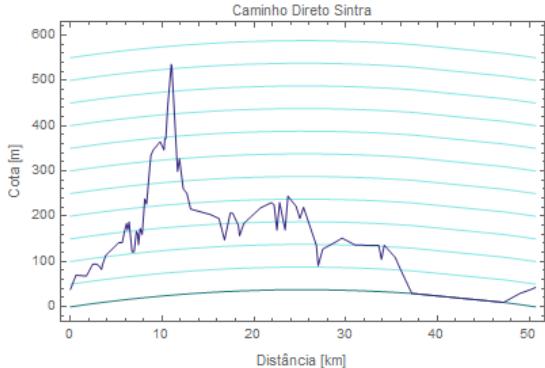
Figura 4: Perfis das ligações em terra plana obtidos no Feixer.

No entanto, é de realçar que a curvatura da Terra tem uma influência significativa nestes perfis, pelo que se torna irrealista basearmo-nos somente nesta representação. No próximo ponto abordaremos, então, a representação que mais sentido fará para a abordagem ao nosso problema: a representação em Terra Esférica.

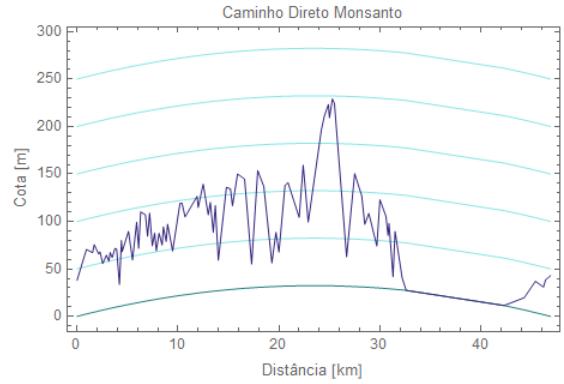
2.1.3 Terra Esférica

Neste ponto, tomaremos em conta a curvatura terrestre e a influência que a mesma tem na projeção da ligação. O raio da Terra, será então multiplicado pela constante K que adotará um valor de $\frac{3}{4}$, segundo a condição 1 presente no programa do Feixer.

Assim sendo, o raio da terra adotado pelo programa feixer será de 8493.33 km.



a) Perfil da ligação passando pela Serra de Sintra



b) Perfil da ligação passando por Monsanto

Figura 5: Perfis das ligações em terra esférica obtidos no Feixer.

2.2 Atenuações ao longo dos Percursos

2.2.1 Atenuação Atmosférica

Consideremos nesta seccão que os repetidores passivos/ativos estão situados nos respetivos pontos mais altos dos percursos, isto é, na Serra de Sintra e Monsanto. Assim sendo, consideremos para este e futuros tópicos do trabalho, no percurso via Serra de Sintra:

- Troço 1: Cabo Rasso - Serra de Sintra (11 Km)
- Troço 2: Serra de Sintra - Alcochete (39.7 Km)

e para percurso via Monsanto:

- Troço 1: Cabo Rasso - Monsanto (25.3 km)
- Troço 2: Monsanto - Alcochete (21,6 km)

Proposta com Repetidor Passivo:

Banda de frequência [GHz]	Atenuação [dB]
4	0.459813
5	0.538321
6	0.635279
7	0.753241
8	0.895238
11	1.5153
13	2.18914
18	7.05522

a) Percurso via Serra de Sintra

Banda de frequência [GHz]	Atenuação [dB]
4	0.42535
5	0.497974
6	0.587664
7	0.696785
8	0.828139
11	1.40173
13	2.02506
18	6.52643

b) Percurso via Monsanto

Tabela 3: Atenuação atmosférica verificada para as diversas frequências admitidas, usando um repetidor passivo em cada percurso.

Proposta com Repetidor Ativo:

Banda de frequência [GHz]	Atenuação Troço 1 [dB]	Atenuação Troço 2 [dB]
4	0.0997623	0.360051
5	0.116796	0.421526
6	0.137832	0.497447
7	0.163425	0.589816
8	0.194233	0.701005
11	0.328764	1.18654
13	0.474961	1.71418
18	1.53072	5.5245

a) Percurso via Serra de Sintra

Banda de frequência [GHz]	Atenuação Troço 1 [dB]	Atenuação Troço 2 [dB]
4	0.229453	0.195897
5	0.26863	0.229344
6	0.317013	0.270651
7	0.375877	0.320907
8	0.446736	0.381403
11	0.756156	0.645572
13	1.09241	0.93265
18	3.52065	3.00578

b) Percurso via Monsanto

Tabela 4: Atenuação atmosférica verificada para as diversas frequências admitidas, usando um repetidor ativo em cada percurso.

Como podemos ver, e como seria expectável de acontecer, numa janela que se estende entre a banda dos 4 aos 8 GHz podemos considerar a atenuação atmosférica como sendo mínima, pelo que, no que toca a atenuação atmosférica, as bandas de frequências mais interessantes seriam as compreendidas entre esta faixa.

2.2.2 Atenuação devido a Hidrometeoritos

Para o cálculo da atenuação suplementar devido a Hidrometeoritos, foram usados os seguintes parâmetros:

- Intensidade de precipitação: 42 mm/h [Zona K];
- Fracção de tempo no ano em que o valor da intensidade de precipitação é excedido: $6.72 * 10^{-5}$ %.

Polarização Horizontal**Proposta com Repetidor Passivo:**

Banda de Frequência [GHz]	Atenuação [dB] via Serra de Sintra	Atenuação [dB] via Monsanto
4	0.858502	0.840201
5	2.17525	2.12888
6	4.64958	4.55046
7	8.74782	8.56134
8	12.9501	12.674
11	29.3594	28.7335
13	41.528	40.6428
18	75.7814	74.166

Tabela 5: Atenuação devido a hidrometeoritos para as diversas frequências em estudo com polarização horizontal e com recurso ao uso de um repetidor passivo.

Proposta com Repetidor Ativo:

Banda de Freqüência [GHz]	Atenuação [dB] via Serra de Sintra		Atenuação [dB] via Monsanto	
	Troço 1	Troço 2	Troço 1	Troço 2
4	0.435738	0.798988	0.676044	0.630245
5	1.10406	2.02446	1.71295	1.5969
6	2.35992	4.32726	3.6614	3.41336
7	4.44001	8.1414	6.88864	6.42197
8	6.5729	12.0524	10.1978	9.50695
11	14.9015	27.3241	23.1196	21.5534
13	21.0778	38.6492	32.7021	30.4867
18	38.4633	70.528	59.6756	55.6328

Tabela 6: Atenuação devido a hidrometeoritos para as diversas frequências em estudo com polarização horizontal e com recurso ao uso de um repetidor ativo.

Polarização Vertical**Proposta com Repetidor Passivo:**

Banda de Frequência [GHz]	Atenuação [dB] via Serra de Sintra	Atenuação [dB] via Monsanto
4	0.657273	0.643262
5	1.6517	1.61649
6	3.50677	3.43202
7	7.14684	6.99449
8	10.5735	10.3481
11	24.6362	24.111
13	34.6711	33.932
18	61.9012	60.5817

Tabela 7: Atenuação devido a hidrometeoritos para as diversas frequências admitidas com polarização vertical com recurso ao uso de um repetidor passivo.

Proposta com Repetidor Ativo:

Banda de Freqüência [GHz]	Atenuação [dB] via Serra de Sintra		Atenuação [dB] via Monsanto	
	Troço 1	Troço 2	Troço 1	Troço 2
4	0.333603	0.611709	0.517582	0.482519
5	0.838332	1.5372	1.30066	1.21255
6	1.77988	3.26367	2.76147	2.5744
7	3.62743	6.6514	5.62792	5.24666
8	5.36665	9.84052	8.32631	7.76225
11	12.5043	22.9283	19.4002	18.086
13	17.5975	32.2676	27.3024	25.4528
18	31.4184	57.6101	48.7453	45.4431

Tabela 8: Atenuação devido a hidrometeoritos para as diversas frequências em estudo com polarização vertical e com recurso ao uso de um repetidor ativo.

Como se pode observar através das tabelas acima ilustradas, e tal como seria de esperar, a atenuação suplementar devido a hidrometeoritos só tem real importância prática para frequências superiores a alguns GHz e para períodos de tempo em que a intensidade de precipitação é elevada.

Assim podemos concluir que para frequências mais elevadas, acima de 13 GHz, a atenuação devido a hidrometeoritos é consideravelmente "pesada"(acima dos 30 dB), o que implicaria a necessidade de compensar o sinal emitido em 1000 vezes, com todo o custo associado a nível energético.

Pelo anteriormente exposto é nossa escolha restringir o conjunto de bandas de frequência em estudo a 4, 5, 6, 7, 8 e 11 GHz.

2.2.3 Atenuação dos Guias

Neste ponto, adotámos uma folga para os guias de cerca de 10 m de forma a contabilizar a possível mobilidade dos equipamentos envolvidos.

Como seria de esperar e como se verifica nas tabelas abaixo, apesar de valores pouco significativos, quanto maior for o mastro, maior atenuação nos guias haverá.

Banda de Frequência [GHz]	Atenuação [dB] via Serra de Sintra			Atenuação [dB] via Monsanto			Guia elíptico
	Emissor	Repetidor Ativo	Recetor	Emissor	Repetidor Ativo	Recetor	
4	0.4214	0.4214	0.4214	1.15885	0.4214	0.4214	EW34
5	0.558	0.558	0.558	1.5345	0.558	0.558	EW43
6	0.778	0.778	0.778	2.1395	0.778	0.778	EW52
7	0.859657	0.859657	0.859657	2.36406	0.859657	0.859657	EW63
8	1.13	1.13	1.13	3.1075	1.13	1.13	EW77
11	2.0	2.0	2.0	5.5	2.0	2.0	EW90

Tabela 9: Atenuação dos Guias para as diversas frequências admitidas.

A análise da tabela revela de forma inequívoca que os valores de atenuação mantêm uma relação direta com as alturas dos mastros. Este padrão é evidenciado pelo facto de, por exemplo, a altura dos mastros no percurso via Serra de Sintra ser equivalente à altura do mastro recetor no percurso via Monsanto.

Nota: A atenuação nos guias calculado pelo Feixer é feita antes de se equacionar o uso de um repetidor passivo, pelo que, a atenuação do mesmo não é contabilizada. Assim, neste ponto, a atenuação dos guias caso queiramos usar repetidor passivo do tipo espelho será, $A_{guias} = \text{Emissor} + \text{Recetor}$, ao passo que a atenuação nos guias caso se queira usar um repetidor ativo, ou um repetidor passivo do tipo costas com costas é, $A_{guias} = \text{Emissor} + \text{Repetidor Ativo} + \text{Recetor}$.

2.2.4 Atenuação devido a Obstáculos

Neste ponto, os dois percursos em estudo mostraram-se eficientes, uma vez que tanto num como no outro não se registaram qualquer tipo de atenuações.

Contudo, o preço a pagar em mastros para que não existisse atenuação variou de um percurso para o outro. Por um lado, no caminho via Serra de Sintra, a instalação de um repetidor passivo/ativo num ponto tão elevado como a Serra de Sintra torna-se uma boa ajuda no que a custos diz respeito.

Já para o percurso via Monsanto, o mastro de emissão em Cabo Rasso, teve de adotar valores consideráveis ($h_e = 45\text{ m}$), tendo sido ainda equacionado na nossa análise continuarmos com um mastro de emissão menor sabendo que para tal teríamos uma atenuação a considerar. No fim, verificou-se que a melhor solução seria não ter qualquer tipo de atenuação de forma a termos uma potência de receção robusta.

2.2.5 Desvanecimento rápido

A análise do desvanecimento rápido é essencial para o design eficaz de sistemas de comunicação, como é o nosso caso, especialmente em ambientes desafiadores onde as condições do canal podem variar rapidamente. Este fenómeno refere-se à rápida variação do sinal de radiofrequência durante um curto período de tempo, resultando em flutuações na intensidade do sinal recebido.

Assim sendo é influenciado por diversos fatores, como obstruções no caminho do sinal, reflexões, difrações e condições atmosféricas.

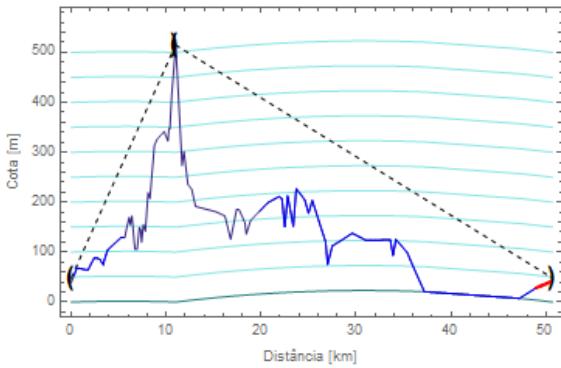
De forma a calcularmos este fenómeno, tem-se que o percurso em estudo terá as seguintes características:

- Classificação do percurso: Costeiro, visto que ao longo dos dois percursos precisamos de atravessar o rio Tejo;
- $C_0 = 3.5$: as duas antenas terminais estão situadas entre 0 e 400 m, colina;
- $C_{Lat} = 0$: uma vez que a latitude da ligação se encontra entre 53º Norte e 53º Sul;
- $C_{Long} = 3$: valor correspondente a longitudes da Europa.

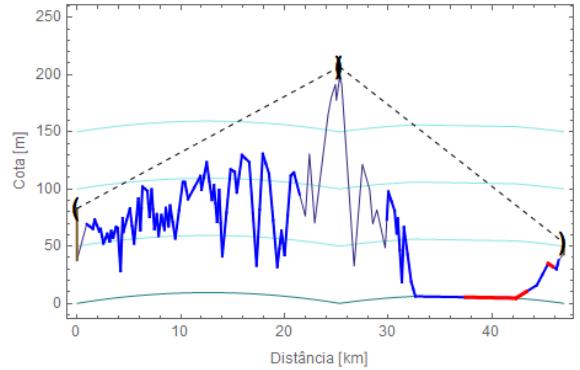
2.2.6 Reflexões no terreno

De modo a que as reflexões se considerem desprezáveis, é necessário que seja verificada a seguinte relação entre potência dispersa (P_s) e a potência direta (P_d) no raio direto,

$$\left(\frac{P_s}{P_d}\right) < 0.1 \quad \text{ou} \quad \left(\frac{P_s}{P_d}\right) < -10 \text{ db}$$



a) Percorso via Serra de Sintra



b) Percorso via Monsanto

Figura 6: Reflexões nos terrenos de ambos os percursos.

Nas figuras acima, a cor vermelha representa os troços com reflexões, e a cor azul indica a área iluminada por uma antena apenas.

Posto isto, conseguimos com segurança afirmar que as reflexões ao longo de todos os percursos (com repetidor ativo ou passivo) consideram-se desprezáveis, uma vez que para toda a gama de frequências temos:

$$\frac{P_s}{P_d} = -\infty \text{ db}$$

excetuando-se apenas uma frequência (4 GHz), no percurso via Monsanto. De qualquer das formas, esta cumpre com os requisitos para que não haja reflexões, já que, $\frac{P_s}{P_d} = -15.1286 \text{ db}$.

Nota:

- Utilizaram-se exclusivamente apenas as imagens dos percursos com repetidor passivo para ilustrar as reflexões, uma vez que já representam a totalidade do percurso.
- A reflexão verificada nos terrenos das imagens acima, apenas se observou para uma frequência que já não está a ser considerada (2 GHz).

2.2.7 Potência de Emissão e Recepção

Mais à frente vamos explicar o fenómeno da zona distante, contudo, neste momento, podemos afirmar que não foi necessário adicionar uma atenuação suplementar, na medida em que os repetidores, em ambos os percursos se encontram na zona distante.

Banda de Frequência [GHz]	Potência de Emissão [dBW]	Potência de Recepção [dBW] via Serra de Sintra	Potência de Recepção [dBW] via Monsanto
4	-1.20412	-82.8661	-85.6223
5	-2.36704	-80.4702	-83.4937
6	-3.31722	-78.7351	-82.1913
7	-4.12058	-77.1214	-80.7321
8	-4.81648	-76.1127	-80.2535
11	-6.47611	-74.3828	-80.2171

Tabela 10: Potencia de Emissão e Potência de Recepção nos dois percursos para as frequências admitidas com recurso a um repetidor passivo.

Como podemos observar na tabela acima ilustrada, a potência de receção é menor no caminho via Serra de Sintra. Uma possível explicação para este fenómeno prende-se com o facto deste percurso ser ligeiramente mais comprido que o percurso via Monsanto, e por esse mesmo motivo contemplar maiores atenuações.

Para o caso em que se está a usar um repetidor ativo, a potência de emissão será igual, tanto no terminal emissor, como no terminal do repetidor, adotando os mesmos valores constantes na tabela acima. As únicas diferenças quando comparado com o caso em que se aplica um repetidor passivo, estão nas potências de receção, que como seria de esperar serão superiores, uma vez que a distância de ligação é mais pequena.

Banda de Frquênci [GHz]	Potência de Receção [dBW] via Serra de Sintra		Potência de Receção [dBW] via Monsanto	
	Troço 1	Troço 2	Troço 1	Troço 2
4	-68.5885	-53.5925	-57.6054	-62.5047
5	-68.1035	-53.1519	-57.3815	-62.0361
6	-67.9311	-53.0344	-57.6215	-61.8839
7	-67.5844	-52.7545	-57.451	-61.5619
8	-67.6920	-52.9425	-58.0717	-61.6992
11	-68.4601	-54.0616	-60.5372	-62.5969
13	-68.5358	-54.517	-61.2491	-62.8135
18	-71.7910	-60.5285	-68.7906	-67.0861

Tabela 11: Potência de receção para os diferentes percursos com recurso a um repetidor ativo para as frequências admitidas.

Nota: De notar que, os valores registados nesta tabela, foram obtidos para diâmetros de antenas diferentes em troços diferentes, o que explica o facto da potência de receção não variar linearmente com a distância dos troços. Mais tarde abordaremos o tópico dos diâmetros das antenas.

3 Feixes Hertzianos Digitais

3.1 Sinal Digital e Largura de Banda em rádio-frequência

Conforme especificado no escopo do projeto, a infraestrutura da ligação deve ser capaz de acomodar um tráfego telefónico de 960 canais. Nesse contexto, seguindo as diretrizes da Hierarquia Digital Plesiócrona (PDH) recomendadas pela ITU-T, optou-se pela implementação da quarta hierarquia (E4) com um débito de transmissão de 140 Mbit/s, o qual suporta os 960 canais, como visto anteriormente.

A estratégia de aplicar os 140 Mbit/s quando comparada à estratégia de utilização de um plano de frequências sobrepostas (cada um com 34 Mbit/s de ritmo de transmissão) revela-se vantajosa ao proporcionar um custo inferior, uma vez que para uma mesma frequência, não apenas atende aos requisitos de capacidade estipulados, mas também leva em consideração a alocação de recursos (não é necessário a duplicação de "feeders" e guias de onda como no caso da outra solução), contribuindo para uma solução equilibrada e economicamente mais viável.

A Largura de Banda em radiofrequência é um conceito crucial que impacta diretamente a qualidade das chamadas e a transmissão de dados. Este termo refere-se à extensão da faixa de frequência utilizada para enviar e receber sinais durante uma chamada, sendo um elemento fundamental na experiência de comunicação sem fio.

Em ligações telefónicas, a eficiente atribuição de largura de banda é essencial para garantir uma transmissão clara e sem interrupções. A quantidade de largura de banda disponível determina a capacidade de suportar chamadas de voz nítidas.

Numa perspetiva geral, o aumento da demanda por serviços avançados, como chamadas de vídeo e streaming em tempo real, coloca desafios na otimização da largura de banda para proporcionar uma experiência telefónica sem contratemplos. A constante busca por eficiência espectral e aprimoramento da capacidade são vitais para atender às crescentes expectativas dos utilizadores.

O espectro eletromagnético é assim dividido em faixas de frequência designadas para diferentes serviços, incluindo comunicações telefónicas. A gestão adequada da largura de banda é crucial para evitar interferências e assegurar uma comunicação estável estando atualmente a cargo da ANACOM - Autoridade Nacional das Comunicações.

Desta forma, consultámos o site deste regulador para perceber que tamanho de Largura de Banda estava reservada a cada faixa de frequências, e para que uso estavam elas destinadas.

Na prática obteve-se a seguinte Largura de banda para as diferentes frequências:

Banda de frequênci [GHz]	4	5	6	7	8	11
Largura de banda em RF (b_{rf}) [MHz]	29	28	60	56	56	56

Tabela 12: Largura de Banda em Radio Frequênci obtida para as diferentes frequências admitidas para uma taxa de transmissão de 140 Mbit/s.

3.2 Modulação da Portadora

A modulação da portadora é um aspecto importante na transmissão de sinais em sistemas de comunicação. Este processo envolve a variação de uma ou mais características de uma onda portadora para transportar informações de um ponto a outro de forma eficaz. De todas as técnicas de modulação, destacam-se a Modulação em Amplitude (AM), Modulação por Deslocamento de Frequência (FSK), Modulação por Deslocamento de Fase (PSK) e Modulação em Amplitude em Quadratura (QAM). Cada uma dessas técnicas apresenta características distintas, influenciando a eficiência e desempenho da comunicação.

Das modulações estudadas em aula, as modulações QAM e PSK mostram-se interessantes devido às suas vantagens em termos de eficiência espectral e robustez. Neste contexto, a análise irá concentrar-se exclusivamente nessas duas técnicas, visando determinar a escolha mais adequada para a nossa ligação.

A Modulação por Deslocamento de Fase (PSK) destaca-se pela sua simplicidade, utilizando variações na fase da onda portadora para transmitir dados. Por outro lado, a Modulação em Amplitude em Quadratura (QAM) incorpora tanto variações de amplitude quanto de fase, permitindo a transmissão de múltiplos bits por símbolo.

Ao considerar cuidadosamente a escolha entre PSK (Modulação por Deslocamento de Fase) e QAM (Modulação em Amplitude em Quadratura), torna-se evidente que a PSK pode apresentar vantagens significativas em certos cenários de comunicação. A preferência pela modulação PSK repousa em suas características específicas que, em determinados contextos, superam as vantagens da QAM.

Em primeiro lugar, a PSK, ao modular apenas a fase do sinal, pode oferecer uma simplicidade e eficiência na implementação em comparação com a QAM. Essa abordagem mais direta pode resultar numa redução dos custos de implementação e uma maior facilidade de operação, especialmente em ambientes de comunicação específicos.

Além disso, em situações onde a resistência a interferências é a principal preocupação, a PSK pode apresentar uma performance robusta. A modulação de fase pode ser menos suscetível a certos tipos de interferência, proporcionando uma transmissão mais estável em ambientes desafiadores.

A escolha estratégica pela modulação PSK visa otimizar a taxa de transmissão de dados em ambientes dinâmicos, priorizando a simplicidade de implementação e a resistência a interferências específicas encontradas no nosso sistema de comunicação.

Assim, após esta análise entre PSK e QAM, a modulação PSK surge como sendo a solução elegida, alinhando-se com a busca incessante pelo perfeito equilíbrio entre a qualidade de comunicação e custo.

3.3 Fiabilidade do Equipamento

A indisponibilidade total da ligação é presenteada por,

$$I_t = 0.3 * \frac{\max(d_{[km]}, 280)}{2500}$$

Esta indisponibilidade pode ser dividida em indisponibilidade devido à chuva (10 % a 20 %), devido ao equipamento (30 % a 40 %) e, também a restantes causas (50 %), como por exemplo, a atividade humana, e interferências de todo o tipo.

Como vimos nos percursos apresentados, as distâncias ($d_{[km]}$) são sempre inferiores a 280 km, valor este que empíricamente valida e analisa melhor o estudo da indisponibilidade quando as distâncias são muito curtas.

Assim, e assumindo a distância máxima (280 km), temos que a indisponibilidade total, $I_t = 0.3 * \frac{280}{2500} = 0,0336\%$

Já a indisponibilidade do equipamento através das recomendações da ITU-R é dada por,

$$I_e = \frac{MTTR}{MTBF} = 1.344 * 10^{-4}$$

De forma a calcular-se a indisponibilidade real do equipamento temos que:

- Tempo médio para deteção, reparação e reposição de uma avaria : $MTTR = 6$ horas ;
- Tempo médio de avarias do emissor : $MTBF_{emissor} = 120000$ horas ;
- Tempo médio de avarias do desmodulador : $MTBF_{desmodulador} = 140000$ horas ;
- Tempo médio de avarias do modulador : $MTBF_{modulador} = 200000$ horas ;
- Tempo médio de avarias do receptor : $MTBF_{receptor} = 200000$ horas ;

Como a nossa ligação é uma ligação bidireccional (duas ligações unidireccionais), sabemos que,

$$MTBF_{bidireccional} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{2}{MTBF_i}} = 19626 \text{ horas}$$

Assim a nossa ligação lógica terá uma indisponibilidade do equipamento igual a,

$$I_e = \frac{MTTR}{MTBF} = \frac{6}{19626} = 3.057 * 10^{-4}$$

Este valor indica-nos que os requisitos necessários pela ITU-R não são cumpridos, $3.057 * 10^{-4} > 1.344 * 10^{-4}$.

Como solução, prosseguiu-se com um canal de reserva com um comutador em cada terminal e um elemento de serviço em paralelo, de forma a cumprirmos a recomendação. Para tal, vamos de novo calcular a indisponibilidade do equipamento.

Para obtermos a nova indisponibilidade do equipamento teremos de seguir os seguintes passos:

Em primeiro lugar, o $MTBF_{comutador} = 90000$. Como a ligação é bidireccional, o tempo médio entre as avarias dos comutadores será dado por,

$$MTBF_{comutadores} = \frac{90000}{2} = 450000 \text{ horas}$$

Em segundo lugar, o MTBF paralelo de duas ligações é,

$$MTBF_{ligação} = \frac{MTTR}{C_2^2(\frac{MTTR}{MTBF_{bidir}})} = 6.41977 * 10^7 \text{ horas}$$

Por fim, temos que o tempo médio de falhas do sistema com reserva corresponde a,

$$MTBF_{sistema} = \frac{1}{\frac{1}{MTBF_{comutadores}} + \frac{1}{MTBF_{ligação}}} = 44968.5 \text{ horas}$$

Logo, a nossa indisponibilidade do equipamento final com comutadores será,

$$I_e = \frac{MTTR}{MTBF} = \frac{6}{38976} = 1.33427 * 10^{-4}$$

Assim, finalmente, a recomendação da ITU-R em relação à fiabilidade do equipamento está cumprida com sucesso, na medida em que, $1.33427 * 10^{-4} < 1.344 * 10^{-4}$.

Nota: $MTTR$ - Mean Time to Rear e $MTBF$ - Mean Time Between Failures.

3.4 Relação Portadora/ruído em rádio-frequência

A relação portadora/ruído (C/N) em radiofrequência é um parâmetro essencial para avaliar a qualidade das transmissões (expressa em dB), onde a potência da portadora é comparada com a potência do ruído no canal de transmissão.

No que toca a ruído térmico, a temperatura de 293 K é vital para a análise das diferentes antenas. Este ruído, conhecido como Johnson-Nyquist, é inerente a sistemas a temperaturas finitas, e não há como fugir dele, pelo que o tomaremos em conta ao longo do projeto.

A (C/N) é uma medida que avalia o sinal desejado em relação ao ruído no canal, o que significa que uma (C/N) mais alta indica uma melhor qualidade do sinal.

À medida que a (C/N) aumenta, a influência do ruído na ligação diminui e a capacidade de distinguir o sinal útil do ruído melhora, resultando numa transmissão mais estável. Inversamente, em ambientes com (C/N) mais baixas podem ter degradação do sinal, interferências e perda de pacotes, algo que foi claramente evitado ao máximo por nós.

O fator de ruído da nossa ligação (Cabo-Raso - Alcochete) é apresentado na tabela seguinte.

Banda de frequência[GHz]	4	5	6	7	8	11
fator de ruído [dB]	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	8.2

Tabela 13: Fator de Ruído para uma ligação Cabo-Raso - Alcochete para as diferentes frequências admitidas com uma taxa de transmissão de 140 Mbit/s.

As relações mencionadas sobre a $\left(\frac{C}{N}\right)_{rf}$ verificaram-se para todos os trajetos analisados ao longo do projeto.

3.5 Recomendações da ITU

Os critérios de qualidade, de acordo com as recomendações F.1189-1 e P.530-8 da ITU-R estão apresentados na tabela 14.

fb [Mbit/s]	SESR	BBER	ESR
1.5 - 5	0.0002 X	$2 * 10^{-4}$	0.04 X
> 5 - 15	0.0002 X	$2 * 10^{-4}$	0.05 X
> 15 - 55	0.0002 X	$2 * 10^{-4}$	0.075 X
> 55 - 160	0.0002 X	$2 * 10^{-4}$	0.16 X

a) Rec. ITU-R P1189-1

fb[Mbit/s]	ber_{SESR}	N[blocos/s]	Nb[bits/bloco]
1.5	$5.4 * 10^{-4}$	2000	832
2	$4.0 * 10^{-4}$	2000	1120
6	$1.3 * 10^{-4}$	2000	3434
34	$6.5 * 10^{-5}$	8000	6120
140	$2.1 * 10^{-5}$	8000	18792
155	$2.33 * 10^{-4}$	192000	801
155	$2.3 * 10^{-5}$	8000	19940

b) Rec. ITU-R P530-9

Tabela 14: Recomendações da ITU aplicadas no projeto.

Uma vez que se escolheu uma frequência de transmissão de 140 Mbit/s, sabemos pelos critérios apresentados em cima que, para termos uma ligação de qualidade e fiável teremos de nos guiar com os seguintes parâmetros:

$$\text{SESR} = 1.6 * 10^{-4}, \text{ BBER} = 2 * 10^{-5}, \text{ ESR} = 6 * 10^{-3}, \text{ rber} = 1 * 10^{-12}, \text{ ber}_{\text{SESR}} = 2.1 * 10^{-5}, \text{ N} = 8000, \text{ Nb} = 18792$$

Nota: X compreendido entre 0.075 e 0.085 (usou-se 0.08).

3.6 Margens

3.6.1 Margem de segurança

A Margem de Segurança refere-se ao espaço adicional ou à diferença entre a potência do sinal recebido e o limiar mínimo necessário para garantir uma comunicação sem erros.

Quando a potência do sinal é superior ao mínimo necessário para a operação sem erros, essa margem adicional protege a comunicação contra flutuações de sinal, atenuações, interferências e outros efeitos adversos que possam ocorrer durante a transmissão.

Assim, achou-se por bem garantir que $M_s > 3$ dB.

A escolha de uma margem de segurança superior a 3 dB garante-nos uma comunicação robusta e confiável, mesmo em condições desafiadoras. Um valor mais elevado de margem de segurança proporciona uma folga maior em termos de potência, reduzindo o risco de erros de comunicação e melhorando a qualidade geral do sistema.

De seguida, vamos analisar as diferentes margens de segurança dos percursos estudados para os respetivos repetidores, aplicando desde já apenas a frequência ótima que equivale à frequência cuja margem de segurança foi maior. Esta frequência para os diferentes percursos analisados foi unânime (6 GHz).

Proposta para a margem de segurança com recurso a um Repetidor Passivo

Frequência ótima [GHz]	Margem de Segurança [dB]	
	via Serra de Sintra	via Monsanto
6	-13.9188	-16.5366

Tabela 15: Margem de segurança proposta para ambos os percursos.

Tal como podemos perceber pelos valores presentes na tabela, a margem de segurança não é cumprida para nenhum dos trajetos usando um repetidor passivo, inviabilizando estas soluções.

De seguida vamos apresentar a (C/N) necessária para cumprimos com a ligação na frequência ótima (6 GHz) para os diferentes percursos:

Proposta para a margem de segurança com recurso a um Repetidor Ativo

Frequência ótima [GHz]	Margem de Segurança [dB]	
	via Serra de Sintra	via Monsanto
	Troço 1	Troço 2
6	7.61866	6.35728
	4.7287	7.88964

Tabela 16: Margem de segurança proposta para ambos os percursos.

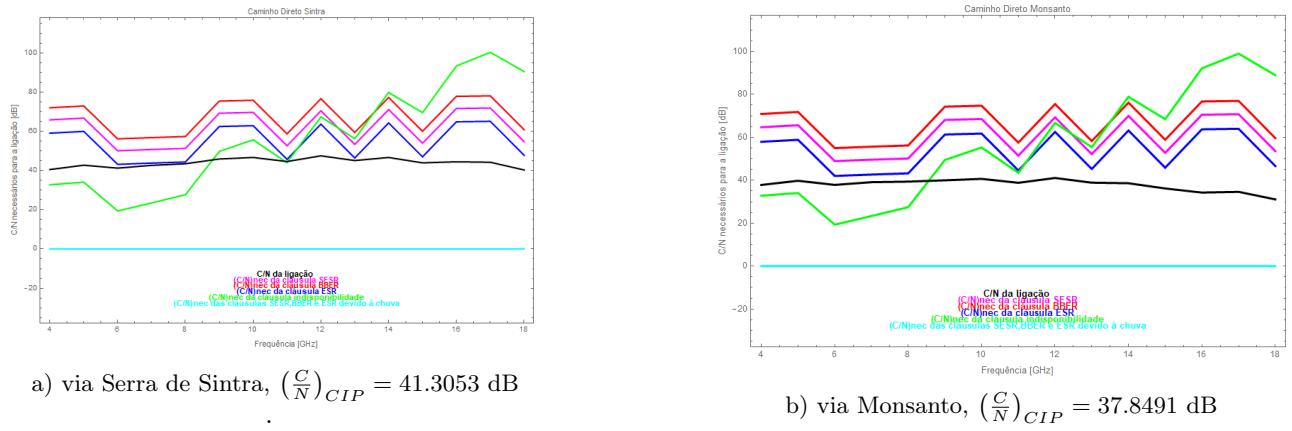


Figura 7: C/N necessário para cumprirmos a ligação do projeto com recurso a um repetidor passivo usando diversidade.

De seguida vamos apresentar a (C/N) necessária para cumprirmos com a ligação na frequência óptima (6 GHz) para os diferentes percursos:

No percurso **via Serra de Sintra** obtivemos os seguintes resultados:

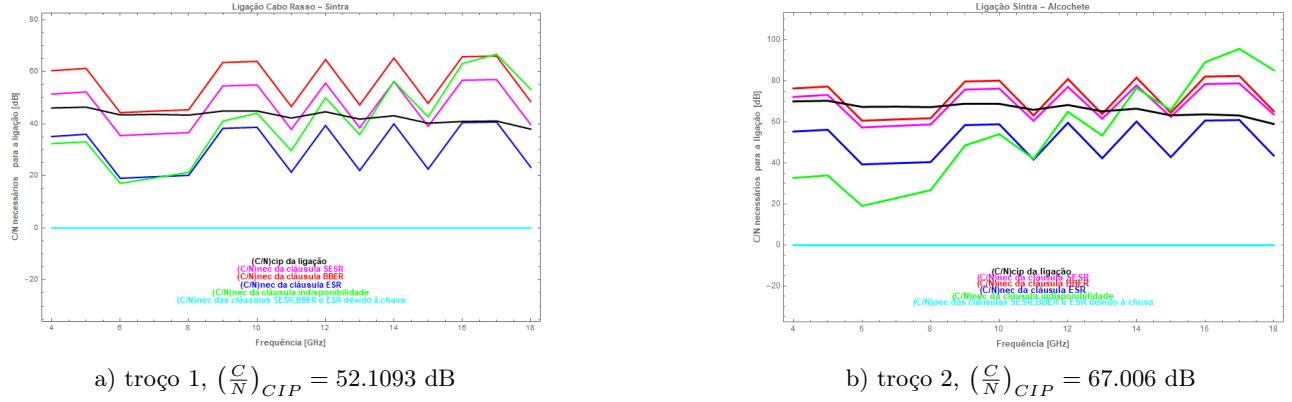


Figura 8: C/N necessário para cumprirmos a ligação do projeto com recurso a um repetidor ativo.

No percurso **via Monsanto** obtivemos os seguintes resultados:

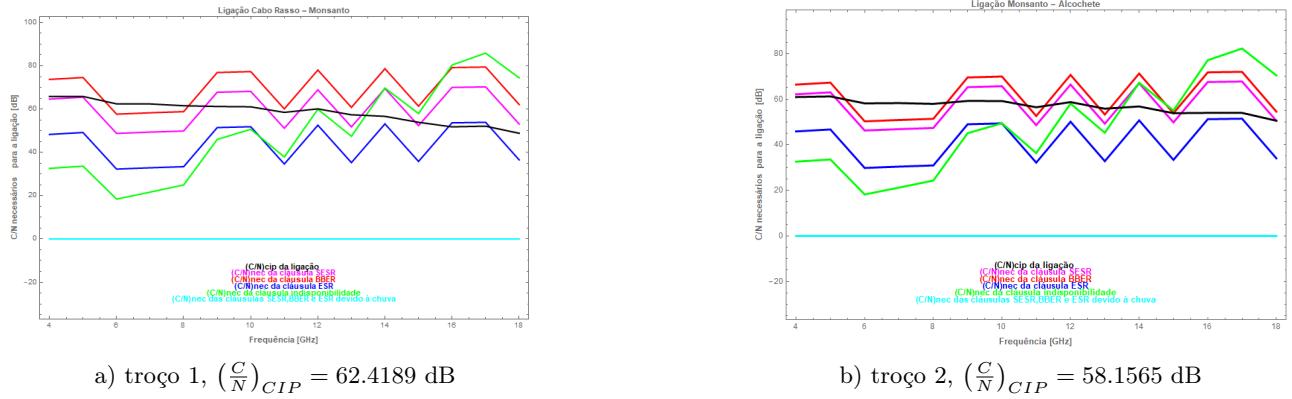


Figura 9: C/N necessário para cumprirmos a ligação do projeto com recurso a um repetidor ativo.

Nota: O facto do gráfico ter uma forma inconsistente deve-se ao facto de não termos catalogadas todas as larguras de banda

existentes no mercado, como, por exemplo a faixa dos 16 GHz. Outra possível razão prende-se com o facto do "m" utilizado na modulação ser alto, o que fragiliza e torna mais suscetível de se verificarem variações nos gráficos.

3.6.2 Margem Uniforme

A Margem Uniforme refere-se à diferença constante entre a potência do sinal recebido e o nível mínimo necessário para uma comunicação sem erros. Por outras palavras, é fundamental para garantir a qualidade e a fiabilidade da transmissão em sistemas de comunicação.

Num sistema de comunicação, a potência do sinal pode variar devido a vários fatores, como a atenuação do sinal durante a propagação, interferências eletromagnéticas, desvanecimento do canal, entre outros. Desta forma, a margem uniforme é introduzida para lidar com essas variações e assegurar que o sinal recebido seja suficientemente forte para ser detetado e decodificado corretamente, mesmo nas piores condições.

A ideia por detrás da margem uniforme é estabelecer um buffer de potência adicional além do nível mínimo necessário para operação livre de erros. Isso significa que, mesmo quando ocorrem variações adversas no ambiente de transmissão, o sinal ainda permanece acima do limiar crítico para garantir uma comunicação confiável.

A determinação da margem uniforme tem em consideração fatores como a taxa de erro desejada, as características do canal de comunicação, a modulação utilizada e as interferências esperadas.

Na prática, a Margem uniforme é obtida da seguinte forma,

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

Desta forma, obtivemos as seguintes M_u para os percursos em estudo:

Proposta para a margem uniforme com recurso a um Repetidor Passivo

Frequência ótima [GHz]	Mu _{SES} R [dB]		Mu _{rber} [dB]	
	via Serra de Sintra	via Monsanto	via Serra de Sintra	via Monsanto
6	23.9284	20.4722	19.0981	15.6419

Tabela 17: Margem uniforme proposta para ambos os percursos.

Proposta para a margem uniforme com recurso a um Repetidor Ativo

Frequência ótima [GHz]	Mu _{SES} R [dB]		Mu _{rber} [dB]		Mu _{rber} [dB]	
	via Serra de Sintra	via Monsanto	Troço 1	Troço 2	Troço 1	Troço 2
6	34.7324	49.6291	45.042	40.7796	29.9021	44.7988

Tabela 18: Margem uniforme proposta para ambos os percursos.

Nota: CIP - Condições ideais de propagação.

3.6.3 Margem Seletiva

Na prática, existem dois métodos de obtermos a Margem Seletiva:

Método A

$s = 0.5$ a 0.8 MHz, $fb = 34$ Mbit/S, 4 PSK

$s = 25$ a 30 Mhz, $fb = 140$ Mbit/s, 16 QAM

$$m_s = \frac{8000}{s[\text{MHz}]}$$

Método B

$$k_t = 1.4 * 10^{-8} * f[\text{GHz}] * d^{3.5} [\text{km}]$$

$$T_s = \frac{\log_2(m)}{fb[\text{Mbit/s}] * 10^6} [\text{s}]$$

$$\tau_m = 0.7 \left(\frac{d[\text{km}]}{50} \right)^n [\text{ns}]$$

$$\eta = 1 - e^{-0.2 * k_t^{3/4}}$$

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

$$m_s = \frac{k_t}{\eta * P_{s/mp}}$$

Por conseguinte, prosseguimos pelo **método B** da recomendação F1093-1 da ITU-R, dado que os nossos dados não se enquadram no método A.

Desta forma, obtivemos as seguintes M_s para os percursos em estudo:

Proposta para a margem seletiva com recurso a um Repetidor Passivo

Frequência ótima [GHz]	Margem Seletiva [dB] via Serra de Sintra	Margem Seletiva [dB] via Monsanto
6	41.8107	42.2955

Tabela 19: Margem seletiva proposta para ambos os percursos.

Proposta para a margem seletiva com recurso a um Repetidor Ativo

Frequência ótima [GHz]	Margem Seletiva [dB] via Serra de Sintra		Margem Seletiva [dB] via Monsanto	
	Troço 1	Troço 2	Troço 1	Troço 2
6	35.3662	43.4502	48.9075	50.8968

Tabela 20: Margem seletiva proposta para ambos os percursos.

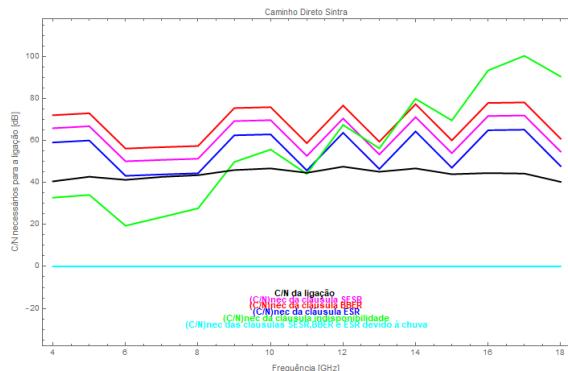
Nota: n compreendido entre 1.3 e 1.5 (usou-se 1.4).

3.6.4 Margem Crítica

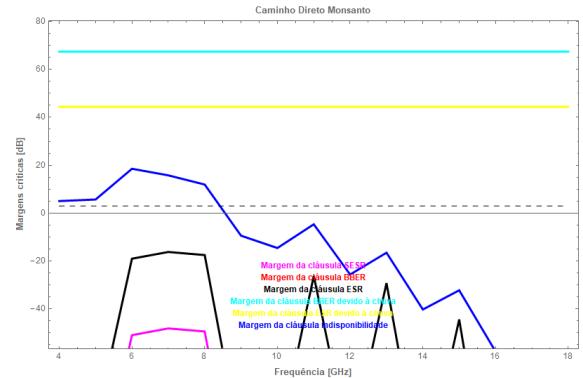
A Margem Crítica personifica a robustez do sinal e indica a folga ou a reserva de potência disponível no canal. Sabemos que, quanto maior a Margem Crítica, mais resistente é o sistema a interferências, variações no canal ou condições adversas.

Nas imagens que se seguem, apenas nos guiámos pela Margem crítica da frequência ótima, 6 GHz.

Proposta para a margem crítica com recurso a um Repetidor Passivo



a) via Serra de Sintra, $M_{\text{crit}} = -63.6387$ dB

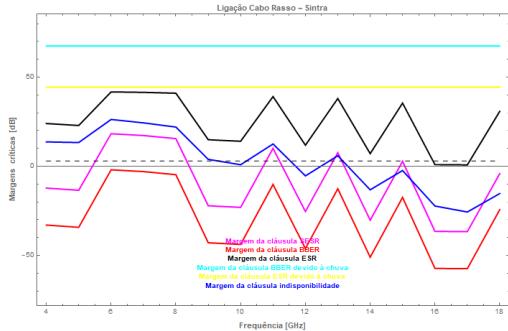


b) via Monsanto, $M_{\text{crit}} = -76.0908$ dB

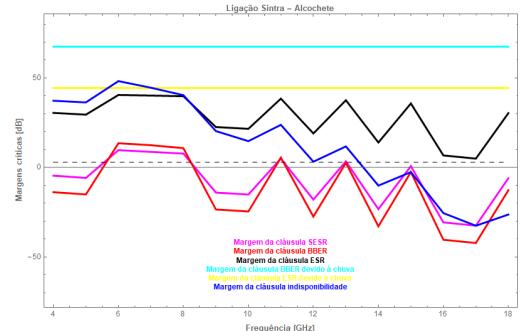
Figura 10: Margem Crítica verificada para os percursos estudados com repetidor passivo.

Proposta para a margem crítica com recurso a um Repetidor Ativo

No percurso via Serra de Sintra obtivemos os seguintes resultados:



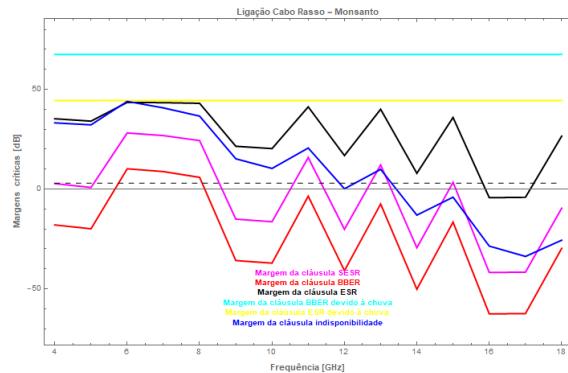
a) Troço 1, $M_{\text{crit}} = 16.0613 \text{ dB}$



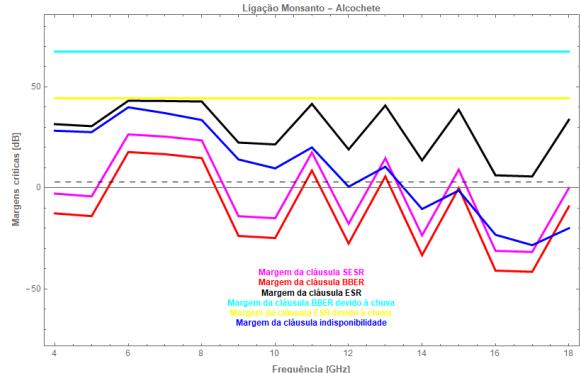
b) Troço 2, $M_{\text{crit}} = 9.55662 \text{ dB}$

Figura 11: Margem Crítica verificada para o percurso via Serra de Sintra.

No percurso via Monsanto obtivemos os seguintes resultados:



a) Troço 1, $M_{\text{crit}} = 10.1845 \text{ dB}$



b) Troço 2, $M_{\text{crit}} = 17.8412 \text{ dB}$

Figura 12: Margem Crítica verificada para o percurso via Monsanto.

Desta forma, é muito provável que o projeto a ser implementado tenha como solução o uso de um repetidor ativo, já que as margens críticas estão abaixo de 0 dB com recurso a um repetidor passivo.

Nota: O facto do gráfico ter uma forma inconsistente deve-se ao facto de não termos catalogadas todas as larguras de banda existentes no mercado, como, por exemplo a faixa dos 16 GHz.

3.7 Igualação e Desvanecimento seletivo

Ao aumentar a Taxa de Erros de Bit (BER), O desvanecimento tem o efeito de minimizar a potência recebida devido à redução na relação sinal-ruído, resultando numa maior taxa de erros binários devido à distorção intersimbólica. Este fenómeno, conhecido como desvanecimento seletivo, torna o canal de transmissão não linear.

Para mitigar os efeitos do desvanecimento seletivo, foram empregues equalizadores nos domínios da frequência e do tempo. Os fatores de redução na área de assinatura de fase mínima e de fase não mínima, alcançados por meio da equalização, são, respetivamente, 490 e 35.

Esta estratégia de equalização visa restaurar a linearidade do comportamento do canal, reduzindo a taxa de erros e melhorando a relação sinal-ruído. A utilização de equalizadores nos domínios da frequência e do tempo demonstra ser eficaz na atenuação do desvanecimento seletivo, proporcionando uma transmissão mais fiável e robusta.

3.8 Diversidade

Para otimizar a relação sinal/ruído numa ligação por feixes hertzianos em telecomunicações, é crucial incorporar o conceito de diversidade. A diversidade não se limita apenas à utilização de distribuições realistas para lidar com desvanecimentos rápidos mas também implica definir a distância entre as antenas para garantir uma diversidade eficaz. Nesse contexto, a escolha de 10 metros

de separação entre as antenas é fundamental, visto que a diversidade espacial requer a existência de caminhos independentes entre as antenas terminais.

Quando se trata de percursos que incluem repetidores passivos, é imperativo empregar antenas distintas. Além disso, as antenas terminais devem possuir direcionalidade suficiente para discriminar entre os sinais dos repetidores passivos. Dessa maneira, ao considerarmos uma ligação equipada com antenas emissoras/recetoras parabólicas e um repetidor do tipo costas-com-costas, todas as condições essenciais para a implementação eficaz da diversidade são atendidas.

Esse enfoque na diversidade busca aprimorar a robustez da comunicação, garantindo que a transmissão seja menos suscetível a interferências e desvanecimentos. Portanto, ao adotar medidas como a seleção criteriosa da distância entre antenas e a escolha adequada de repetidores passivos, podemos fortalecer significativamente o desempenho e a confiabilidade das ligações por feixes hertzianos em cenários de telecomunicações avançados.

Ao longo dos nossos testes, para as propostas de percurso onde eram usados repetidores passivos, a diversidade contribuia e muito para uma melhor qualidade da ligação, reduzindo e muito os valores das cláusulas de qualidade que têm de ser cumpridas durante este projeto (SESR, BBER e ESR). De notar que apesar do grande contributo desta técnica muitas das vezes os valores obtidos continuavam a não cumprir com os valores estabelecidos para cada cláusula.

Posto isto, é-nos claro que a diversidade é essencial para uma ligação que use repetidores passivos de forma a garantir a melhor qualidade de sinal. O mesmo não se aplicará de forma tão linear a uma ligação que faça uso de repetidores ativos, visto que como os troços da ligação são mais curtos, as perdas acabam por não se tornar significativas ao ponto de ser preciso a implementação de uma técnica de diversidade, apesar de, quando aplicada, contribuir para uma melhor fiabilidade da ligação.

3.9 Guia de Ondas

Os guias de onda desempenham um papel fundamental na transmissão eficiente de sinais eletromagnéticos, representando uma tecnologia fundamental em diversos campos, incluindo comunicações e telecomunicações. Dentro deste vasto espectro, destacam-se os guias de secção elíptica, amplamente utilizados devido às suas propriedades particulares.

Os guias de onda de secção elíptica, exemplificados na figura 7.6 do capítulo 7.7 de [1], emergem como uma escolha proeminente no desenho e implementação de sistemas de comunicação. Estes guias apresentam uma seção transversal elíptica, proporcionando características únicas que se adequam a uma variedade de aplicações.

O comprimento do guia de onda é determinado pela soma das alturas dos mastros emissor/receptor e das folgas necessárias para alcançar as antenas. Na prática, é comum adicionar uma folga de 10 metros em ambos os mastros, garantindo a eficiência e a flexibilidade do sistema:

$$l_{\text{guia terminal}} = h_{\text{mastro}} + l_{\text{folga}}$$

Os guias de onda são essenciais para direcionar e proteger sinais eletromagnéticos ao longo de distâncias consideráveis. Permitem a transmissão de informação de forma precisa e com a mínima perda de sinal, sendo vitais em contextos como o nosso, as chamadas telefónicas, onde a clareza e a integridade do sinal são fundamentais.

De forma a termos uma fiabilidade maior e um custo menor da ligação, tivemos como foco analisar as várias hipóteses disponíveis no mercado, e vimos que além dos guias de onda de secção elíptica, existem diversos tipos, cada um projetado para atender a requisitos específicos. Desde guias retangulares a circulares. A escolha do guia de onda depende das características desejadas do sistema, como largura de banda, perda de inserção e capacidade de suportar diferentes modos de propagação. No caso em que nos encontramos a melhor solução é sem dúvida os guias elípticos.

Resumindo, os guias de onda desempenham um papel central na infraestrutura de comunicação, com os guias de secção elíptica destacando-se pela sua versatilidade. Ao otimizar o comprimento do guia e escolher a geometria apropriada, é possível garantir uma transmissão eficiente e confiável, contribuindo significativamente para o sucesso de sistemas de comunicação, como é o caso das chamadas telefónicas.

4 Análise técnica e Operacional dos Percursos

4.1 Características dos Mastros e Antenas

4.1.1 Altura dos mastros

Mastro	Altura [m]
Emissao	10
Receçao	10
Emissão repetidor	10
Recepção repetidor	10

a) Caminho via Serra de Sintra

Mastro	Altura [m]
Emissao	45
Receçao	10
Emissão repetidor	10
Recepção repetidor	10

b) Caminho via Monsanto

Tabela 21: Características dos Mastros dos percursos analisados.

4.1.2 Coordenadas Geográficas das Antenas e Altitudes dos mastros

Antena	Coordenadas Geográficas		Distância [Km]		Cota [m]	Y [m]	
	Latitude	Longitude	via Serra de Sintra	via Monsanto		via Serra de Sintra	via Monsanto
Cabo Rasso	38°42'34.4"N	9°28'30.42"W	0	0	38	-37.8	-32.4
Serra de Sintra	38°46'55.2"N	9°23'29.66"W	11.0	-	510	-12.1	-
Monsanto	38°43'37.83"N	9°11'20.69"W	-	25.3	197	-	-0.2
Alcochete	38°44'33.97"N	8°56'20.05"W	50.7	46.9	43	-37.8	-32.4

Tabela 22: Informações relevantes aos mastros e antenas.

Desta forma, a altura real das antenas será dada por:

Antena	Cota + Mastro + Y [m]	
	via Serra de Sintra	via Monsanto
Cabo Rasso	10.2	59.6
Serra de Sintra	502.9	-
Monsanto	-	206.8
Alcochete	15.2	20.6

Tabela 23: Informações relevantes aos mastros e antenas.

4.1.3 Azimutes e ângulos de fogo

De forma a vermos os ângulos de fogo das antenas, iremos calcular os seguintes ângulos:

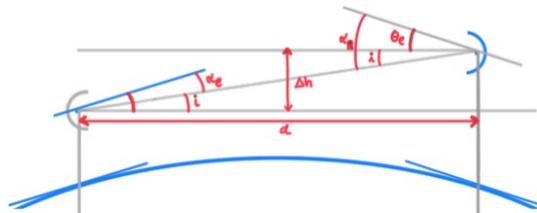


Figura 13: Diagrama para o cálculo dos diferentes ângulos de fogo.

$$\alpha_E = \theta_E - i, \quad \alpha_R = \theta_R + i, \quad i = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta h}{d} \right), \quad \theta_E = \tan^{-1} \left(\frac{d}{r_T} \right)$$

Para a obtenção dos azimutes recorremos a um site([5] da bibliografia).

Antena	Azimute [°]	Ângulo de fogo [°]
Emissao	41.94	-2.42
Receção	276.48	0.8
Emissão repetidor	96.20	-0.54
Recepção repetidor	222	2.497

a) Caminho via Serra de Sintra

Antena	Azimute [°]	Ângulo de fogo [°]
Emissao	85.35	-0.195
Receção	265.56	0.454
Emissão repetidor	85.41	-0.306
Recepção repetidor	265.53	0.365

b) Caminho via Monsanto

Tabela 24: Azimutes e ângulos de fogo das antenas dos percursos.

4.2 Repetidores

Antes de mais nada, a escolha do repetidor é fundamental para garantir a robustez e eficácia do percurso. Em ambientes onde a comunicação é desafiadora devido a distâncias significativas, obstáculos físicos ou interferências, a presença estratégica de repetidores torna-se fundamental.

Ao optarmos por repetidores ativos, asseguramos que o sinal de comunicação seja fortalecido e transmitido de forma consistente ao longo do percurso. Estes dispositivos têm a capacidade de amplificar e retransmitir os sinais, superando possíveis obstáculos e prolongando a cobertura da comunicação.

Da mesma forma, os repetidores passivos também são responsáveis por transmitir a informação de forma consistente ao longo do percurso, superando possíveis obstáculos, não fortalecendo no entanto o sinal transmitido.

Na zona distante em que nos encontramos,

$$d > d_{\min} = \frac{2 * d_a^2}{\lambda},$$

Caso os repetidores estivessem colocados na zona próxima de um dos terminais, o ganho do repetidor deve ser corrigido de um fator em termos de $\frac{1}{K}$ e L definidos por:

$$\frac{1}{K} = \frac{\pi \lambda d}{4a_{ef}} \quad , \quad L = d_a \sqrt{\frac{\pi}{4a_{ef}}}$$

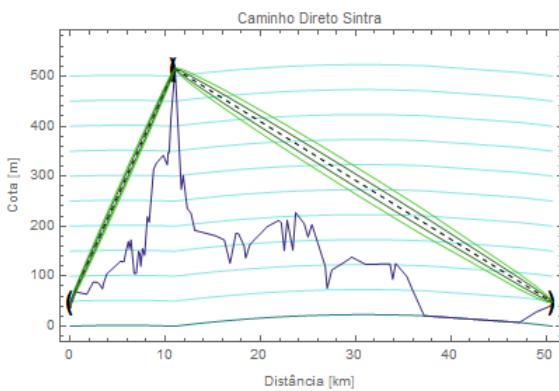
Graças a esta escolha estratégica, conseguimos manter uma comunicação estável e confiável, superando desafios geográficos e ambientais que, de outra forma, poderiam comprometer a qualidade da ligação.

Por fim, esta abordagem contribui significativamente para a fiabilidade e sucesso do percurso em curso, destacando-se como uma decisão acertada, permitindo-nos, assim, manter uma comunicação eficiente mesmo em condições adversas.

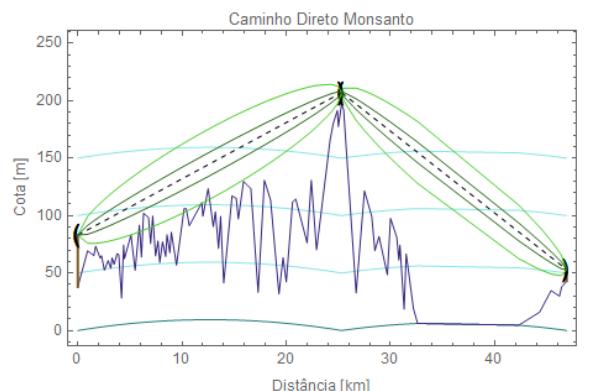
Nota: d_a é o diâmetro da antena, d é a distância entre o repetidor e a antena terminal e a_{ef} é a área efetiva do repetidor passivo.

4.2.1 Repetidor Passivo

Os percursos em estudo com recurso à instalação de um repetidor passivo estão representados nas imagens que se seguem,



a) Percurso via Serra de Sintra



b) Percurso via Monsanto

Figura 14: Instalação de um repetidor passivo para ambos os percursos.

De seguida vamos analisar a melhor opção para o nosso repetidor passivo:

Eselho Plano

O ganho do nosso eselho plano anda na casa dos 95 %.

Através do Feixer, sabemos que a área efetiva estava acima do esperado, e, sabendo que o caminho a seguir não seria com este tipo de eselho, apenas vamos apresentar a forma de cálculo dos ângulos de incidência:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{z_{\text{pico}}[\text{km}]}{h_{\text{repetidor}}[\text{m}] - h_{\text{emissor}}[\text{m}]} \right)^\circ \quad \theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{z_{\text{final}}[\text{km}] - z_{\text{pico}}[\text{km}]}{h_{\text{repetidor}}[\text{m}] - h_{\text{receptor}}[\text{m}]} \right)^\circ$$

$$\Phi = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$$

Uma vez obtido o ângulo total de incidência, a área efetiva é dada por:

$$a_{ef} = a_{\text{total}} * \cos(\Phi) > 35 \text{ m}^2$$

O ganho do repetidor é calculado da seguinte forma (contudo, e dado que os valores da área são exorbitantes, não o calculámos):

$$G_{\text{rep}} = 20 * \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} * a_{ef} \right) + 10 * \log_{10}(\eta_{\text{rep}}) [\text{dBi}]$$

Costas-com-Costas

A área efetiva é do repetidor costas com costas é dada da seguinte forma:

$$a_{ef} = \pi * \left(\frac{d_a}{2} \right)^2 * \eta_{\text{rep}} > 35 \text{ m}^2$$

O ganho do repetidor é calculado da seguinte forma (contudo, e dado que os valores da área são exorbitantes, não o calculámos):

$$G_{\text{costas-com-costas}} = 2 * G_{\text{parabólicas}} \Leftrightarrow$$

$$= 2 * \left[20 * \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} * a_{ef} \right) + 10 * \log_{10}(\eta_{\text{rep}}) \right] [\text{dBi}]$$

4.2.2 Repetidor Ativo

Um repetidor ativo tem como principal função regenerar e retransmitir o sinal recebido, amplificando-o para compensar a atenuação que ocorre ao longo do percurso estendendo a distância efetiva de transmissão de sinais.

O repetidor ativo detecta o sinal enfraquecido, regenera a sua forma de onda original e o retransmite com uma amplitude apropriada, que neste caso corresponde à potência inicialmente transmitida no terminal de emissão.

O termo "ativo" em repetidor ativo refere-se à capacidade do dispositivo de amplificar o sinal. O repetidor conta com amplificadores que aumentam a potência do sinal, permitindo estender a distância entre os pontos de transmissão e recepção.

Além de compensar a atenuação, os repetidores ativos também desempenham um papel na redução de ruídos indesejados durante a transmissão. Ao regenerar o sinal, eles podem ajudar a remover ou minimizar o impacto de interferências, o que pode resultar numa escusada implementação da técnica de diversidade.

4.2.3 Escolha do repetidor

Como já vimos, tanto o repetidor passivo (eselho plano ou costas com costas) como o repetidor ativo desempenham um papel preponderante na transmissão de sinais de um ponto a outro.

Após todo o processo de modelagem do uso de um repetidor passivo, chegámos à conclusão que era inconcebível o uso de um repetidor do tipo eselho plano capaz de assegurar a margem de segurança estabelecida para o projeto (3 dB), isto porque a área calculada transcedia em muito o limite máximo viável da área de construção de um eselho plano (35 m^2), mesmo usando a técnica de diversidade.

Da mesma forma e tendo em conta os cálculos feitos pelo grupo, o uso de um repetidor costas com costas não respeitaria as margens de segurança, visto que as antenas que o compõem têm um rendimento bastante inferior ao eselho plano e assim tal como este último, seria insuficiente para que todas as condições fossem respeitadas.

Resta-nos então a aplicação de um repetidor ativo que seja capaz de introduzir e restabelecer potência de sinal no percurso, de forma a ir de encontro com o desejado, ou seja, cumprir com todas as cláusulas e margens de qualidade da ligação, definidas para o projeto.

De um ponto de vista financeiro, esta opção permite-nos poupar na utilização da técnica de diversidade, e com isso a duplicação de antenas, guias de onda e "feeders", o que por si só já é um grande contributo para alcançar o projeto de menor custo.

Outra vantagem, é a utilização de antenas de menor diâmetro que aquelas que são usadas num projeto que conte com um uso de um repetidor passivo. Isto deve-se ao facto dos trajetos serem menores e de não ficarmos condicionados ao facto do sinal ter de ter potência suficiente para chegar até ao terminal de receção, mas sim até ao repetidor ativo, e deste até ao terminal de receção.

5 Análise financeira dos Percursos

Antes de mais nada, temos dois tipos de custos:

1. **custos de primeiro estabelecimento** - Custo dos estudos e projetos de execução do equipamento e das infraestruturas.
2. **custos de exploração** - custos de operação, de manutenção, financeiros e fiscais (As amortizações de equipamento e instalações são excluídas por motivos fiscais).

De forma a verificarmos o melhor caminho vamos usar os nossos conhecimentos sobre finanças. O percurso escolhido por nós irá ser o percurso cujo custo é o mais diminuto.

Em primeiro lugar, fomo-nos informar à ANACOM, e ficámos a saber que:

- **Guias de Onda:** $15 * (1 + \frac{10}{f[GHz]}) \text{ €}$
- **Antenas Parabólicas:** $1.000 + 75 * d^3[m] \text{ €}$
- **Torres espiadas:** $3.500 + 300 * h[m] \text{ €}$
- **Emissor e Recetor (Equipamento radioelétrico):** 35.000 € (cada um)
- **Abrigo e sistema de alimentação:** 60.000 €
- **Aluguer de frequências:**

Faixa de Frequências (GHz)	1-3	4-11	12-15	18-24	25-39	40-59	61-71	>71
Comprimento mínimo da ligação (L_{min})	n.a.	10 km	5 km	2 km	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Taxa por MHz (euros)	48.50 x √L	57.50 x √L	30.50 x √L	15.50 x √L	12.70 x √L	8.80 x √L	4.50 x √L	0.85 x √L
Código da taxa	143101	143102	143103	143104	143105	143106	143107	143108

Figura 15: Taxa aplicável por ligação hertziana bidirecional e por canal consignado (A vermelho as frequências equacionadas neste projeto).

Passemos agora a detalhar o relatório de contas deste projeto:

Despesa anual (despesa fixa → anuidade):

$$\text{custo}_{\text{anual}} = 0.15 * \text{custo}_{\text{inicial}} + \text{custo}_{\text{banda/anual}} \text{ €} \quad (1)$$

Valor atual líquido:

$$\text{ValLíquido} = \sum_{i=1}^{25} \frac{r_i - \text{custo}_{\text{anual}}}{(1 + T^a)^i} - \text{custo}_{\text{inicial}} \text{ €} \quad (2)$$

Trafego médio por canal telefónico:

$$T_{\text{tel}} = 0.2 + 0.02 * t_i \text{ Erlang} \quad (3)$$

Receitas num certo ano i:

$$r_i = n_{\text{canais}} * T_{\text{tel}} * \frac{N}{t} * C_3 \text{ €} \quad (4)$$

Tempo de retorno:

$$t_r = \frac{\text{custo}_{\text{inicial}}}{r_c} = \sum_{i=1}^{25} \frac{1}{(1 + \frac{TIR}{100})^i} \quad (5)$$

Custo de uma chamada de 3 mins:

$$C_3 = \frac{\frac{\text{custo}_{\text{inicial}}}{t_r} + \text{custo}_{\text{anual}}}{n_{\text{canais}} * T_{\text{tel}} * \frac{N}{3}} * (1 + \frac{t_{\text{inflação}}}{100})^{t_i} \text{ €} \quad (6)$$

Custo total:

$$\text{custo}_{\text{total}} = \text{custo}_{\text{inicial}} + \sum_{i=1}^{25} [\text{custo}_{\text{anual}} * (1 + t_{\text{inflação}})^i] \text{ €} \quad (7)$$

Nota: A opção da escolha do uso de torres espiadas, com fundações típicas e montagem anti-torção, em detrimento de torres metálicas auto-suportadas, deve-se ao facto, dos custos de manutenção serem mais comedidos e ainda ao facto de no máximo admitir uma torção de aproximadamente 0.5graus, o que para o nosso projeto se revela muito pouco relevante.

5.1 Caminho Via Serra de Sintra, com repetidor ativo

Tomemos em conta que a frequência ótima para este percurso, quer no troço 1 quer no troço 2, são 6 GHz.

5.1.1 Custos do equipamento usado

Item	Custo Unitário	Quantidade	Total
Antenas Parabólicas (1/4.5 m de diâmetro)	1.075/7.834,40 €	4	17.818,8 €
Emissor ou Recetor	35.000 €	3	105.000 €
Abrigo e Sistemas de Alimentação	-	-	60.000€
Torres Espiadas ($h = 10$ m)	6.500 €	3	19.500 €
Guias de Ondas Elípticos	40 €/m	60 m	2.400 €
Total			207.118,8 €

Tabela 25: Custos totais dos equipamentos no percurso via Serra de Sintra.

Seguindo o relatório das contas passo por passo, temos que:

- Foram usadas 4 antenas, 2 com diâmetro de 1 m e as outras 2 com diâmetro de 4.5 m;
- Foram usados 3 emissores ou receptores, um em Cabo Rasso, outro na Serra de Sintra e outro em Alcochete;
- Neste projeto, e tendo em conta as folgas dadas, foram precisos 60 m de guias de onda elípticas $[(h_{\text{mastro}} + h_{\text{folga}}) * 3]$;

5.2 Caminho Via Monsanto, com repetidor ativo

Tomemos em conta que a frequência ótima para este percurso, quer no troço 1 quer no troço 2, são 6 GHz.

5.2.1 Custos do equipamento usado

Item	Custo Unitário	Quantidade	Total
Antenas Parabólicas (2/3 m diâmetro)	1.600/3.025 €	4	9.250 €
Emissor ou Recetor	35.000 €	3	105.000 €
Abrigo e Sistemas de Alimentação	-	-	60.000€
Torres Espiadas ($h = 45$ m)	19.250 €	1	19.250 €
Torres Espiadas ($h = 10$ m)	6.500 €	2	13.000 €
Guias de Ondas Elípticos	40 €/m	95 m	3.800 €
Total			210.300 €

Tabela 26: Custos totais dos equipamentos no percurso via Monsanto.

Seguindo o relatório das contas passo por passo, temos que:

- Foram usadas 4 antenas, 2 com diâmetro de 3 m e as outras 2 com diâmetro de 2 m;
- Foram usados 3 emissores ou receptores, um em Cabo Rasso, outro na Serra de Sintra e outro em Alcochete;
- Neste projeto, e tendo em conta as folgas dadas, foram precisos 95 m de guias de onda elípticas $[(h_{\text{mastro}} + h_{\text{folga}}) * 3]$;

5.3 Percurso escolhido

Após feita uma extensa análise financeira sobre os projetos, aquele cujos custos de equipamento para efetuar a ligação se apresentou mais barato foi o percurso via Serra de Sintra (cerca de 3.298,85 € mais barato) em relação ao percurso via Monsanto. Os custos que não apresentámos ainda iriam ter uma razão de proporcionalidade direta para com estes derivado do facto de terem os mesmos encargos de exploração.

Assim sendo, o percurso mais eficaz e portanto escolhido foi:

Cabo-Raso - Serra de Sintra - Alcochete

5.4 Panorama Final

5.4.1 Custos de Exploração

Tendo em conta que a frequência ótima achada para o nosso projeto foi de 6 GHz, e depois de consultado o site da ANACOM, obtemos um custo anual de $57.5 * \sqrt{L}$, em que no percurso escolhido, $L = 50.7Km$. Desta forma o custo de aluguer desta banda de frequência (custo_{banda/anual}) tem um valor anual de 409,42 €.

Os encargos anuais são avaliados numa módica quantia de 31.067,82 €.

O valor total dos custos de exploração anuais (1) terá então um valor (correspondente à soma dos dois valores anteriormente calculados) de 31.477,24 €.

5.4.2 Custo total e custo diário médio

Para este e outros pontos abordados mais à frente, consultámos o site da ANACOM (ponto [4] nas referências bibliográficas), onde era feito um balanço do 3º trimestre de 2023 e se explorava o tema sobre o número de minutos médio por mês que se verificou ao longo desse período. Foram então registados, em média, 26 minutos por mês. A partir deste valor

O custo total aproximado para o projeto é dado por 7. Ao fim de 25 anos vamos ter um custo de 1.570.452,98 €.

De forma a determinarmos o custo diário médio por canal, iremos dividir os custos totais de uma chamada de 3 minutos pelo número de dias num ano multiplicado pelo número de canais, ou seja,

$$\text{custo diário médio} = \frac{C_3}{365 * n_{\text{canais}}}$$

5.4.3 Receita

O tráfego médio anual é dado por 3, pelo que, todos os anos terá valores distintos (por exemplo, no ano 1 teremos um tráfego de 0,22 Erlang) e a receita (4) irá variar naturalmente com o aumento do tráfego anual (por exemplo, no ano 1 teremos uma receita de €).

É esperado que a partir do 27º dia de Janeiro do 9º ano começaremos a ter lucro, dado que $t_r = 9.077$ anos, através de 5.

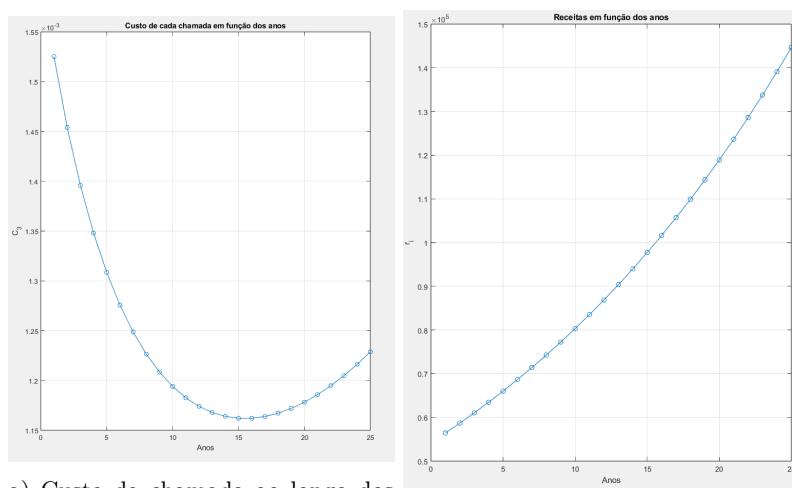
Vamos agora analisar a evolução do negócio para o trajeto mais económico entre Cabo Raso e Alcochete.

5.4.4 Representação gráfica

Com o intuito de aprofundarmos a nossa análise e de a tornarmos mais elucidativa, iremos transformar os nossos dados numa série de gráficos. O objetivo é apresentar informações minuciosas, que de outra forma passariam despercebidas, através de gráficos que destacarão nuances essenciais do nosso panorama, com uma representação visual dos dados.

Os gráficos a serem gerados abrangerão aspectos fundamentais do nosso projeto, delineando o curso de 25 anos. Destacaremos o Custo de chamadas num ano, proporcionando uma visão clara das variações ao longo do tempo. Além disso, exploraremos as Receitas e apresentaremos o Lucro do projeto final, fornecendo uma análise abrangente das diferentes facetas financeiras do projeto.

Este passo estratégico permitirá-nos à uma visão mais aprofundada, capacitando-nos de tomar decisões informadas e estratégicas para o sucesso do projeto.



a) Custo da chamada ao longo dos anos
b) Receitas em função dos anos

Figura 16: Visão Global: Evolução Financeira ao Longo do Tempo.

Por fim e não menos importante, o lucro é a recompensa tangível do nosso esforço, refletindo não só o retorno financeiro, mas também o sucesso da nossa dedicação em melhorar as comunicações móveis em Portugal e além-fronteiras. É a validação de um investimento bem empregue e a certeza de que num futuro próximo irá investimento que nos proporcione um futuro risonho como protagonistas de mais um projeto no ramo das Telecomunicações.

A forma de cálculo do lucro é muito direta, apenas necessitamos de subtrair as receitas totais com as despesas totais ao longo dos 25 anos. Neste projeto em específico, o nosso lucro está dentro daquilo que esperávamos atendendo ao nosso conhecimento e dedicação no projeto:

Lucro: 779.841.87 €

Em suma, o objetivo do projeto foi cumprido na sua totalidade, facilmente corroborado pelo gráfico do lucro, este que é bastante risonho ao fim dos 25 anos. A incorporação de elementos visuais, não apenas elevou o nível da nossa compreensão e dos demais leitores, como também facilitou a identificação de padrões e tendências significativas.

6 Reflexões Finais

Ao longo da implementação deste projeto, deparamo-nos com desafios notáveis, especialmente ao projetar e estruturar uma ligação de feixes hertzianos no cenário real, no trajeto entre Cabo Raso e Alcochete. Para além das inúmeras dificuldades e obstáculos enfrentados, como atenuações e a necessidade de cumprir rigorosamente as recomendações da ITU, as nossas escolhas foram determinadas pelo objetivo primordial de minimizar e reduzir os custos associados ao projeto. Esta tarefa, por vezes complexa, exigiu uma ponderação cuidadosa, pois as decisões tomadas foram frequentemente condicionadas pelos valores obtidos nos cálculos.

Apesar destas adversidades, é gratificante concluir que o projeto de feixes hertzianos proposto foi bem-sucedido e culminando na realização da ligação entre Cabo Raso e Alcochete, cumprindo integralmente os padrões preconizados. Este projeto proporcionou-nos não só a oportunidade de enfrentar desafios do mundo real, mas também de aplicar de forma prática os conhecimentos adquiridos na disciplina de Sistemas de Telecomunicações Via Rádio (STVR).

Relativamente à ligação entre Cabo Raso e Alcochete, destacamos que a distância percorrida é relativamente extensa e que o terreno, embora apresente algumas características favoráveis, certamente apresentou desafios únicos. Este contexto geográfico e topográfico foi devidamente considerado durante o projeto, incluindo a análise dos potenciais obstáculos e a escolha de trajetórias otimizadas.

As dificuldades que enfrentámos ao longo do projeto incluíram, inicialmente, a utilização do programa Feixer, bem como dúvidas relacionadas a parâmetros que, por vezes, não estavam claramente documentados. No entanto, através de discussões colaborativas com colegas e o esclarecimento de dúvidas com os professores, conseguimos superar esses obstáculos e obter os resultados desejados. Outra complexidade surgiu na adaptação aos padrões da ITU, pois alguns parâmetros exigiram ajustes para garantir a conformidade, o que, por sua vez, influenciou os custos do projeto.

Quanto à frequência de operação, procuramos uma abordagem estratégica para otimizar os custos, tendo em conta a sua preferência por 6 GHz sendo esta a escolha final.

Identificámos também oportunidades de melhoria no projeto, tais como a consideração de um repetidor ativo em vez de passivo, bem como a avaliação de alternativas para a frequência de operação.

Em síntese, este projeto proporcionou-nos não apenas a aplicação prática de conhecimentos técnicos, mas também o desenvolvimento de habilidades analíticas e de resolução de problemas em situações do mundo real. O trajeto entre Cabo Raso e Alcochete serviu como um laboratório valioso para compreender e superar os desafios inerentes às comunicações de feixes hertzianos.

7 Referências Bibliográficas

- [1] C. Salema, Feixes Hertzianos, IST Press, 2011
- [2] ANACOM, "Redes de ligações hertzianas ponto-ponto unidireccionais em faixas de frequências acima de 1 GHz", [Online], Disponível em https://www.anacom.pt/render.jsp?categoryId=336153&fbclid=IwAR2AeUwaje-3YChO-OrYmpfVFTVf1HI-IAOCpJbk_E-nohFOh_0_ZLM1-fw#4
- [3] Topographic Map. (s.d.), Disponível em <https://pt-pt.topographic-map.com/>
- [4] ANACOM, "Serviço telefónico fixo - 3.º trimestre de 2023", [Online], Disponível em <https://www.anacom.pt/render.jsp?contentId=1768527>
- [5] FCC, "Distance and Azimuths Between Two Sets of Coordinates", [Online], Disponível em <https://www.fcc.gov/media/radio/distance-and-azimuths>

8 Anexos

8.1 Cotas

d(Km)	Cota(m)	d(Km)	Cota(m)
0.00	38	14.80	108
0.94	68	15.20	106
1.54	63	15.40	88
1.71	71	15.90	121
2.15	60	16.60	115
2.28	62	17.30	25
2.55	49	17.90	123
2.92	57	18.50	106
3.16	50	19.30	25
3.29	59	19.70	57
3.49	53	20.00	36
3.76	62	20.60	106
3.93	61	20.90	109
4.20	23	22.00	72
4.40	69	22.40	127
4.47	57	22.90	67
5.10	77	24.20	164
5.50	46	24.50	179
5.91	85	24.90	191
6.11	57	25.00	177
6.31	95	25.30	197
6.78	91	25.50	192
6.99	68	26.70	31
7.19	92	27.50	119
7.46	57	28.20	96
7.69	70	28.50	66
7.86	51	28.90	78
8.13	69	29.70	44
8.43	56	30.00	93
8.56	75	30.60	76
8.83	59	30.80	56
8.97	77	30.90	69
9.47	48	31.30	13
10.20	97	31.50	61
10.40	97	32.20	13
10.70	82	32.60	0
11.90	102	41.40	2
12.00	90	44.30	13
12.50	114	45.40	33
13.00	81	46.20	29
13.20	94	46.40	37
13.50	62	46.90	43
13.70	90		
14.00	32		

Figura 17: Distância em Km e a sua respetiva cota para o percurso direto Cabo Rasso-Alcochete Via Monsanto

d(Km)	Cota(m)	d(Km)	Cota(m)	d(Km)	Cota(m)	d(Km)	Cota(m)
0.00	38	7.82	140	18.30	145	33.90	71
0.61	68	8.11	218	18.44	122	34.20	103
1.76	63	8.30	206	19.90	149	35.40	77
2.43	87	8.77	313	20.72	182	36.00	50
2.71	87	9.06	325	21.90	193	37.20	0
3.03	84	9.79	341	22.20	188	37.20	0
3.40	73	10.20	322	22.50	132	39.00	25
3.50	83	10.30	347	22.80	193	50.10	36
3.86	103	10.40	346	23.40	132	50.70	43
5.29	128	10.60	416	23.70	207		
5.65	127	11.00	510	24.60	184		
5.91	152	11.68	272	25.00	157		
6.12	168	11.88	300	25.40	182		
6.23	153	12.30	233	26.80	98		
6.40	171	12.70	222	27.00	53		
6.72	104	13.10	187	27.50	90		
6.95	104	15.26	172	28.90	106		
7.19	148	16.20	162	29.60	115		
7.33	143	16.80	114	31.00	101		
7.42	118	17.42	173	32.00	101		
7.61	154	17.70	172	33.60	102		

Figura 18: Distância em Km e a sua respetiva cota para o percurso Cabo Rasso-Alcochete Via Serra de Sintra

8.2 Feixer

O feixer será entregue em duas partes distintas, ma vez que se recorreu a um repetidor ativo:

1. Cabo-Raso - Serra de Sintra (troço1)
2. Serra de Sintra - Alcochete (troço2)