

# INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES VIA RÁDIO

PROJETO DE UMA LIGAÇÃO POR FEIXES HERTZIANOS

SETÚBAL-QUELUX

---

*Autores:*

David Brito

Francisco Freiria

*Números:*

97260

97236

*Professores: António José Castelo Branco Rodrigues*

*José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino*

---

Dezembro de 2020

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Parâmetros utilizados</b>	<b>3</b>
2.1	Perfil do percurso . . . . .	3
2.2	Altura dos mastros das antenas e suas características . . . . .	3
2.3	Atenuação de Obstáculo . . . . .	4
2.4	Atenuação atmosférica . . . . .	4
2.5	Distribuição da disponibilidade . . . . .	4
2.6	Atenuação provocada por hidrometeoritos . . . . .	5
2.7	Atenuação dos guias . . . . .	5
2.8	Repetidores passivos . . . . .	5
2.9	Desvanecimento rápido . . . . .	5
2.10	Reflexões no terreno . . . . .	6
2.11	Atenuação suplementar . . . . .	6
2.12	Potência de recepção . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Feixes Hertzianos Digitais</b>	<b>7</b>
3.1	Sinal Digital . . . . .	7
3.2	Fiabilidade do Equipamento . . . . .	7
3.3	Analise da Frequência da ligação e modulação utilizada . . . . .	7
3.4	Recomendações da ITU . . . . .	9
3.5	Margens . . . . .	10
3.5.1	Margem Uniforme . . . . .	10
3.5.2	Margem selectiva . . . . .	10
3.5.3	Margem de segurança . . . . .	10
3.6	Igualação e Desvanecimento Selectivo . . . . .	10
3.7	Diversidade . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Análises de Percurso</b>	<b>12</b>
4.1	Raio directo . . . . .	12
4.2	Repetidor activo . . . . .	13
4.3	Repetidor passivo . . . . .	13
4.3.1	Repetidor passivo Costas-com-Costas . . . . .	13
4.3.2	Repetidor passivo Espelho plano . . . . .	13
4.3.3	Repetidor passivo Associação de Espelhos . . . . .	15
4.4	Ângulo de fogo . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Análises de Custo</b>	<b>17</b>

<b>6</b>	<b>Solução final</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>Referências</b>	<b>22</b>
<b>9</b>	<b>Anexos</b>	<b>23</b>
9.1	Pontos da Ligação (distância(Km) cota(m)) . . . . .	24

# Capítulo 1: Introdução

No âmbito da unidade curricular de Sistemas de Telecomunicação Via Rádio foi proposto o dimensionamento de uma ligação bidireccional de feixes hertzianos digitais entre Setúbal e Queluz. Sendo este um trabalho que pretende fazer a ponte entre a componente teórica e os problemas que a engenharia encontra na vida real, foram definidas algumas métricas para o seu dimensionamento. Assim, esta ligação deve ser capaz de suportar um tráfego telefónico até 960 canais e deve garantir as especificações definidas pela ITU-R para uma durabilidade de 25 anos.

O objectivo do projecto passa pela identificação da melhor configuração possível para a ligação e de forma a obter o menor custo de uma chamada telefónica com duração de 3 minutos. Para tal iremos analisar vários percursos para o feixe, o uso de repetidores, a banda de frequências até as características físicas do ambiente. Está previsto o recurso a diversas ferramentas como o *Google Maps* para obter o perfil do percurso, o script *FeixerV313* do *Mathematica* para a análise da ligação, previsão de equipamento e análise matemática do sistema. Sendo o objectivo final do projecto obter o menor custo da chamada telefónica, é necessário saber a evolução do custo médio de utilização do sistema para uma chamada telefónica bidireccional com a duração de 3 minutos considerando:

- Encargos de exploração anuais, iguais a 15% do custo inicial;
- Encargos nulos com terrenos e direitos de passagem;
- Valor residual nulo;
- Duração do projecto de 25 anos;
- Taxa de utilização anual de acordo com o definido pela ANACOM;
- Tráfego médio por canal telefónico igual a  $(0.2 + 0.002 * t_{i[anos]})$  Erlang;
- Taxa interna de retorno (a preços constantes) de 10%;
- Taxa de inflação de 2%;

Para a do projecto, é necessário ter em conta as restrições impostas no enunciado:

- Valor máximo da potência do emissor dado pela expressão:  $p_m = p_0/f^b$  com  $p_m$  em W, f em GHz,  $p_0 = 5$  e  $b=1.2$ .
- Fator de ruído do receptor dado pela expressão:  $F = F_0 + a * f$  com F em dB, f em GHz,  $F_0 = 8$  e  $a = 0.1$ ;
- Rendimento máximo das antenas parabólicas: 55%

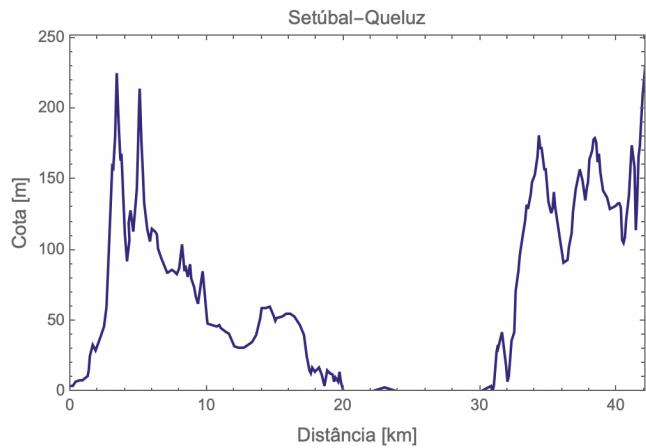
Mediante estas condições, o objectivo deste projecto corresponde à procura de uma solução que cumpra todas as normas da ITU-R, enquanto se procura minimizar os custos associados ao aluguer de frequências e de materiais (mastros, repetidores, antenas, emissor, receptor, abrigo, sistema de alimentação e guias), para uma ligação de feixes Hertzianos.

# Capítulo 2: Parâmetros utilizados

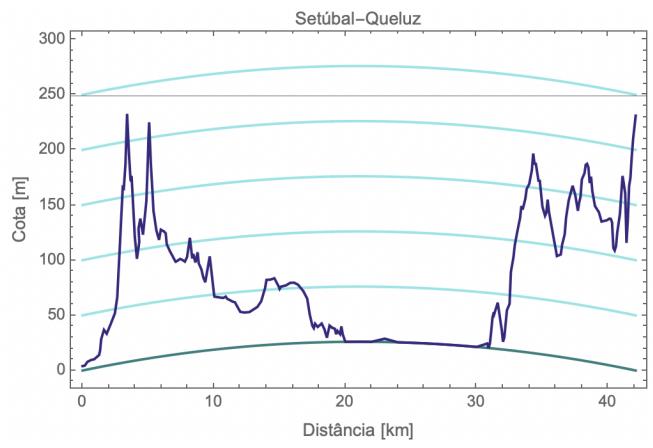
## 2.1 Perfil do percurso

O percurso é um factor muito importante, uma vez que podemos ter custo mais elevados com a má escolha do mesmo. Partindo deste princípio a escolha do terreno foi feita de modo a colocar os terminais na melhor localização, em Setúbal e Queluz, facilitando a ligação. Obteve-se assim um percurso de ligação directa, para uma primeira análise, de 42.1 Km. Nas figuras (a) e (b), é apresentado o perfil do percurso directo com terra plana e terra esférica. É necessário considerar o modelo de aproximação à terra esférica com um valor típico de  $K=4/3$ , que corresponde a um valor do raio equivalente da terra da do pela equação 2.1:

$$r_{eq} = \frac{4}{3} \times 6370 = 8493.33Km \quad (2.1)$$



(a) Perfil do percurso da ligação directa com terra plana.



(b) Perfil do percurso da ligação directa com terra esférica.

Em primeira análise podemos observar que existem dois obstáculos principais entre os 3Km e os 6Km entre o terminal emissor e receptor que atenuará o sinal, o que nos permite concluir que irá ser necessário a utilização de um ou mais repetidores.

## 2.2 Altura dos mastros das antenas e suas características

Teve-se em consideração que a altura dos mastros das antenas deve deixar um mínimo de 3m entre o solo e o extremo inferior da antena e que o mastro não deve ser superior a 30. Assim, e cumprindo as normas em cima descritas, procurou-se um tamanho ideal para os mastros de forma a tentar utilizar menos repetidores possíveis para que os gastos sejam os menores. É ainda necessário ter em atenção que o custo dos mastros é directamente proporcional à sua altura.

Para a ligação de feixes hertzianos acima de 1 GHz é recomendado o uso de parabólicas do tipo reflector. Assim e recorrendo a fabricantes destas antenas sabemos que o diâmetro pode ser de : 0.6, 1, 1.5, 2, 3 e 4.5m. Ainda o ganho

da antena aumente consoante o diâmetro da mesma, como podemos ver na equação 2.2, é necessário ter em atenção que o custo ( $c_a$ ) também será maior como podemos compreender pela equação 2.3.

$$G_{[dB]} = 20\log_{10}\left(\frac{\pi d_{a[m]} f_{[MHz]}}{300} + 10\log_{10}(\eta)\right) \quad (2.2)$$

$$c_a = 1000 + 75d_{a[m]}^3 \quad (2.3)$$

## 2.3 Atenuação de Obstáculo

Esta atenuação surge quando temos um obstáculo que intercepta a 1ºElipsóide de Fresnel. No nosso caso em específico o obstáculo principal é a serra da Arrábida, desta forma para o cálculo da atenuação recorremos ao Feixer utilizando o método de Deygout que consiste no modelo ponto-a-ponto.

## 2.4 Atenuação atmosférica

A atenuação atmosférica ocorre devido à presença de oxigénio e vapor de agua na atmosfera e o seu valor é desprezável para frequências inferiores a 1 GHz. Para o cálculo da atenuação foram considerados os parâmetros que caracterizam as condições atmosféricas em Portugal Continental.

- Temperatura a atmosfera: 25ºC;
- Humidade relativa da atmosfera: 85%;
- Pressão atmosférica: p=1013 milibar;

## 2.5 Distribuição da disponibilidade

Relativamente à indisponibilidade das ligações por feixes hertzianos, existem três factores de grande importância a ter em conta, Chuva, Equipamento e Outros aspectos. Sabendo que a indisponibilidade máxima para a ligação é  $I_{máx} = 3.36 * 10^{-4}$ , conseguimos saber as diferentes indisponibilidades:

- Indisponibilidade devida à precipitação  $I_{chuva} = 3.36 * 10^{-5}$ ;
- Indisponibilidade devida ao equipamento  $I_{equi} = 1.344 * 10^{-4}$ ;
- Indisponibilidade devida a outras causas  $I_{outros} = 1.68 * 10^{-4}$ ;

## 2.6 Atenuação provocada por hidrometeoritos

A precipitação provoca dispersão, absorção e alterações na polarização das ondas radioeléctricas para frequências superiores a alguns GHz. O coeficiente de atenuação é diferente para a polarização horizontal e vertical, devido à forma das gotas da chuva. A polarização horizontal apresenta valores mais elevados e por isso será a polarização estudada, assumindo assim valores para o pior caso possível. Para calcular o valor desta atenuação é usado o valor de  $42(\text{mm}/\text{h})$  para a intensidade de precipitação na Zona K, com uma fração do tempo do ano em que o valor da intensidade de precipitação é excedido um valor de  $3.36 \times 10^{-5}$ .

## 2.7 Atenuação dos guias

A atenuação introduzida pelos guias depende do comprimento da folga nos terminais do emissor e do receptor e da frequência de trabalho. A folga usada no Feixer para o projecto é de 10m.

## 2.8 Repetidores passivos

Os repetidores passivos permitem cumprir funções como, contornar obstáculos, restabelecer o nível de potência do sinal e regenerar sinais digitais. Sendo que o número de troços da ligação é igual ao número de repetidores e o uso destes irá ajudar a potencia de recepção. Existem assim dois tipos de repetidores passivos:

- Espelho Plano;
- Costas-com-Costas.

O repetido passivo é mais atraente do ponto de vista da relação  $(C/N)_{CIP}$ , quanto maior for a frequência, menor for a distância do obstáculo aos terminais e quanto maior for a atenuação provocada pelo obstáculo. Se o repetidor não se encontra na zona distante é necessário introduzir um factor correctivo devido à associação de dois espelhos.

## 2.9 Desvanecimento rápido

O desvanecimento rápido ocorre quando um sinal chega ao receptor através de vários percursos. Este é determinado no Feixer segundo o método da Recomendação P.530-8 da ITU-R. Considerou-se assim um percurso terrestre e os seguintes parâmetros:

- Tempo em que o gradiente médio da refractividade é inferior a  $-100N/\text{Km} : Pl = 20\%$ ;
- $C_0 = 3.5$ , uma vez que a menor das cotas das antenas terminais está situada entre 0 e 400 metros e o percurso ser constituído por colinas;
- $C_{Lat} = 0$ ;
- $C_{Long} = 3$ ;
- Latitude do percurso colocada a  $38^\circ$ .

## 2.10 Reflexões no terreno

As reflexões causadas pelo terreno são um factor importante em consideração. Deste modo para as interferências entre o raio directo e o raio reflectido serem nulas têm que satisfazer a relação da equação 2.4, onde  $P_s$  é a potência de raio directo e  $P_d$  é a potência dispersa. Usa-se também um parâmetro de caracterização da rugosidade da superfície do terreno para o troço definido de  $s = 0.01$ .

$$\frac{P_s}{P_d} \leq -10dB \quad (2.4)$$

## 2.11 Atenuação suplementar

A principal métrica de avaliação da atenuação suplementar é a avaliação da zona distante entre antenas, sejam elas emissora/receptoras ou repetidores. Isto é, no caso dos terminais estarem fora da zona distante do repetidor é necessário considerar um factor correctivo para o ganho do mesmo. Assim, a zona distante pode ser calculada pela equação 2.5 e o factor correctivo pela equação 2.6

$$d > d_{min} = \frac{2d_a^3}{\lambda} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{\pi \lambda d_1}{4a_{ef}}, L = d_a \sqrt{\frac{\pi}{4a_{ef}}} \quad (2.6)$$

Após o varrimento de todas as frequências para a avaliação do  $d_{min}$ , distância mínima para ser considerado zona distante, concluímos que o repetidor estaria na zona distante para todas elas não sendo necessário a introdução do factor correctivo no ganho do repetidor.

## 2.12 Potência de recepção

A potência de recepção é calculada pela fórmula de Friis, para valores de zona distante da antena de maiores dimensões, equação 2.7. No caso desta não estar na zona distante, introduzes uma atenuação suplementar.

$$p_{min} \leq \frac{2d_a^3}{\lambda} \quad (2.7)$$

# Capítulo 3: Feixes Hertzianos Digitais

Actualmente, os novos sistemas de feixes hertzianos já são praticamente todos digitais, em particular para telefonia múltipla, os elevados ritmos binários e os custos competitivos tornam a utilização dos sistemas de feixes hertzianos em sistemas digitais cada vez mais generalizados. Deste modo os feixes hertzianos digitais competem com os sistemas de comunicação por fibra óptica pois conseguem proporcionar capacidades de transmissão elevadas, exigindo uma ligação física entre os terminais.

## 3.1 Sinal Digital

Como visto anteriormente, é suposto que a ligação suporte um tráfego telefónico de 960 canais. Assim, segundo a Hierarquia Digital Plesiócrona (PDH) recomendada pela ITU-T, foi escolhida a terceira hierarquia (E3) com um débito de transmissão de 34 Mbit/s que suporta 480 canais. Esta escolha deve-se a podermos ter duas portadoras com polarizações diferentes, uma vertical e outra horizontal, cada uma suporta 480 canais, tendo no final os 960 canais. Ao Utilizar o plano de frequências sobrepostas pretendemos obter um menor custo, uma vez que o ritmos de transmissão é menor.

## 3.2 Fiabilidade do Equipamento

Na caracterização da fiabilidade de um equipamento é habitual considerar que as avarias têm uma distribuição exponencial negativa, caracterizada por um tempo médio entre acontecimentos. A indisponibilidade do equipamento, por ligação bidireccional, deve cumprir a recomendação da ITU-R. Foram utilizados os seguintes parâmetro:

- Tempo médio de avarias do emissor:  $MTBF_{emissor} = 120000h$ ;
- Tempo médio de avarias do desmodulador:  $MTBF_{desmodulador} = 140000h$ ;
- Tempo médio de avarias do modulador:  $MTBF_{modulador} = 200000h$ ;
- Tempo médio de avarias do receptor:  $MTBF_{receptor} = 200000h$ ;
- Tempo médio para detecção, reparação e reposição de uma avaria:  $MTTR = 6h$ ;
- 1 canal de reserva com 1 elemento de serviço em paralelo;
- Tempo médio entre as avarias:  $90000h$ ;
- Indisponibilidade devido ao equipamento usando um canal de reserva  $I_{equir} = 1.344 * 10^{-4}$ ;

## 3.3 Analise da Frequência da ligação e modulação utilizada

As frequências de trabalho definidas pela entidade reguladora das telecomunicações em Portugal,a ANACOM, são estas  $f_{GHz} = 2, 6, 7, 8, 11, 13, 15, 18, 23, 32$  as frequências para ligações de feixes hertzianos ponto a ponto. Posto isto e

considerando as normas previstas pela ITU-R foram então analisadas de forma a encontrar a óptima para o percurso. Para tal, recorremos à análise qualitativa das frequências:

- Excluímos as frequências de ligação a cima de 15 GHz devido à susceptibilidade a perturbações provocadas pela chuva, seja a dispersão, mudança de polarização ou absorção.
- Sabemos que a frequência de **6 GHz** é usualmente destinada a ligações por feixes hertzianos analógicos com uma capacidade de 1800 canais telefónicos ou feixes hertzianos digitais com uma capacidade geralmente de 140 Mbit/s ou 155 Mbit/s. Ainda nesta secção vamos concluir que a capacidade para o nosso perfil de ligação deverá ser de 34 Mbit/s, excluindo assim esta frequência.
- Sabemos também que a frequência de **7 GHz** é destinada a feixes hertzianos analógicos com a capacidade de 60, 120 ou 300 canais. Como visto anteriormente, a ligação deve assegurar um tráfego telefónico até 960 canais, sendo este um critério de exclusão desta frequência.
- Deste modo, a gama de frequências a considerar de forma a assegurar a qualidade da ligação fica reduzida a: 2,8,11, 13 e 15 GHz.

A frequência é um dos parâmetros mais sensíveis para obter uma ligação óptima uma vez que quanto maior for, maior é a sua atenuação em espaço livre, as perturbações provocadas pela chuva (descritas no primeiro tópico desta secção), o desvanecimento uniforme, a potência de emissão e o factor de ruído, porém o ganho das antenas e dos repetidores será também maior. É de igual importância considerar que para frequências mais baixas, o desvanecimento torna-se um factor muito importante para determinar a qualidade da ligação. Assim, outros critérios terão de ser usados para encontrar um equilíbrio na escolha da frequência de trabalho para o perfil de ligação proposto.

De seguida efectuou-se o varrimento das frequências trabalho acima referidas através do Script do *Mathematica 8, FeixerV313*.

As simulações foram efectuadas com dois tipos de modulações, m-PSK e m-QAM. Para m-PSK temos  $m = 2^n$  e para m-QAM temos  $m = 2^2n$  com ( $n=1,2,3,\dots$ ). Deve ser usada sempre a modulação com o menor valor possível para minimizar a complexidade, que geralmente leva a um menor custo. Para quando o valor de m é igual para as duas modulações optámos pela modulação QAM, pois permite ter custos do projecto inferiores, quando  $m \leq 8$ , e um valor menor na relação sinal-ruído  $(\frac{C}{N})_{CIP_{min}}$ , quando  $m \geq 8$ . Para determinar os valores da largura de banda em radiofrequência, utilizamos um valor de excesso de banda do filtro de Nyquist  $\beta = 0.1$  de forma a maximizar o aproveitamento da banda uma vez que este varia entre 0.1 e 0.5. Os valores para o espaçamento entre canais para cada frequência é disponibilizado pela ANACOM, e encontra-se no anexo em bibliografia [2].

Como pretendemos determinar a modulação mais adequada para os vários valores do valores da largura de banda em radiofrequência, vamos calcular o número mínimo de níveis por palavra através da equação 3.1.

$$b_{rf} = \frac{b_{orf}}{1 + \beta} \quad (3.1)$$

Podemos então calcular o valor de m sabendo o valor da largura de banda em radiofrequência através de:

$$b_{rf} = \frac{f_b}{\log_2 m} \Leftrightarrow m = 2^{\frac{f_b(1+\beta)}{b_{rf}}}$$
(3.2)

f (GHz)	$b_{orf}$ (MHz)	$b_{rf}$ (MHz)	m	$m_{min}$	Modulação
2	1,75	1,590909	2.7129E+6	-	-
	3,5	3,181818	1.6471E+3	-	-
	7	6,363636	40.5845	64	64-QAM
	14	12,72727	6.3706	8	8-QAM
	8	29,65	2.3973	4	4-QAM
	11	40	1.9119	2	2-PSK
13	3,5	3,181818	1.6471E+3	-	-
	7	6,363636	40.5845	64	64-QAM
	14	12,72727	6.3706	8	8-QAM
	28	25,45455	2.5240	4	4-QAM
	56	50,90909	1.5887	2	2-PSK
	3,5	3,181818	1.6471E+3	-	-
15	7	6,363636	40.5845	64	64-QAM
	14	12,72727	6.3706	8	8-QAM

Figura 3.1: Larguras de banda e factor de excesso de banda para as várias frequências a considerar para uma ligação ponto-a-ponto.

Na tabela da figura 3.1 é possível verificar os valores de  $b_{rf}$  associados aos espaçamento entre canais quando o  $m_{min} \geq 64$ , considerando os parâmetros  $\beta = 0.1$  e  $f_b = 34$  Mbits/s.

Sabendo que quanto maior for o valor de m, mais a modulação pode apresentar níveis de erro mais elevados e consequentemente o valor da relação sinal-ruído pode ser maior.

É ainda importante considerar que quanto maior for o espaçamento entre canais de radiofrequência,  $b_{orf}$  maior vai ser a largura de banda ,  $b_{rf}$  e por conseguinte maior o custo do aluguer à ANACOM. Assim devemos ainda considerar o valor mais baixo de  $b_{orf}$  de forma a encontrar a solução óptima.

Posto isto, a melhor frequência a utilizar e implementada para esta ligação é a frequência de 13 GHz com  $b_{orf} = 28$  MHz e  $m = 4$ , utilizando a modulação 4-QAM, pois é a que apresenta a modulação menos complexa e um valor do espaçamento entre canais de radiofrequência mais baixo. Foi também tido em conta que a frequência estava na zona distante dos repetidores de forma a evitar o recurso a um factor correctivo como visto na secção "Atenuação suplementar".

### 3.4 Recomendações da ITU

Os critérios de qualidade estão definidos pelo cumprimento das cláusulas SESR, BBER e ESR. Para as recomendações F.1189-1 ITU-R e P.530-8 ITU-R foi atribuído um valor típico para a taxa de erros residual  $rber = 10^{-12}$  e um  $X = 0.08$ . Deste modo obtivemos os seguintes resultados:

<b>f<sub>b</sub>(Mbit/s)</b>	<b>SESR</b>	<b>BBER</b>	<b>ESR</b>
34	1x10 <sup>-4</sup>	2x10 <sup>-4</sup>	0.006
<b>f<sub>b</sub> (Mbit/s)</b>	<b>berSESR</b>	<b>N(blocos/s)</b>	<b>Nb(bits/bloco)</b>
34	7x10 <sup>-5</sup>	8000	6120

Figura 3.2: Parâmetros obtidos segundo a recomendação F.1189-1 e P.530-9.

## 3.5 Margens

### 3.5.1 Margem Uniforme

A margem Uniforme é calculada através da equação 3.3.

$$M_u = \left( \frac{C}{N} \right)_{CIP} - \left( \frac{C}{N} \right)_{min} \quad (3.3)$$

### 3.5.2 Margem selectiva

Para a margem selectiva foi usado o método B da recomendação F1093-1 da ITU-R, uma vez, que vão ser consideradas modulações com um número de níveis por palavra de  $m \leq 64$ .

### 3.5.3 Margem de segurança

De modo a que a margem de segurança mínima ser 3dB, pela equação 3.4 devemos garantir que a diferença entre a relação sinal/ruído em condições ideais de propagação e a relação sinal/ruído mínima para cumprir as cláusulas é maior que 3 dB.

$$M_u = \left( \frac{C}{N} \right)_{CIP} - \left( \frac{C}{N} \right)_{min} > 3dB \quad (3.4)$$

## 3.6 Igualação e Desvanecimento Selectivo

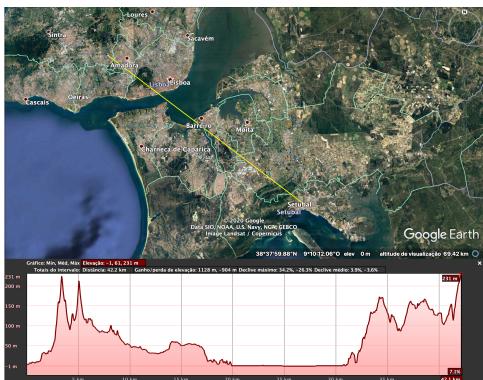
Sabe-se que para feixes hertzianos digitais, o desvanecimento minimiza a potência recebida e aumenta o *bit error rate* (BER) uma vez que a relação sinal-ruído diminui devido ao aumento da taxa de erros binários por distorção intersimbólica. Assim, o canal de transmissão deixa de comportar de uma forma linear e este efeito é designado por desvanecimento selectivo. Caso houvesse uma diminuição da amplitude do sinal o efeito seria o desvanecimento uniforme. Posto isto, de forma a anular o efeito do desvanecimento selectivo recorre-se a igualadores no domínio da frequência e do tempo. O factor de redução na área de assinatura de fase mínima por recurso à igualação é 490 e na área de assinatura de fase não mínima é de 35.

### 3.7 Diversidade

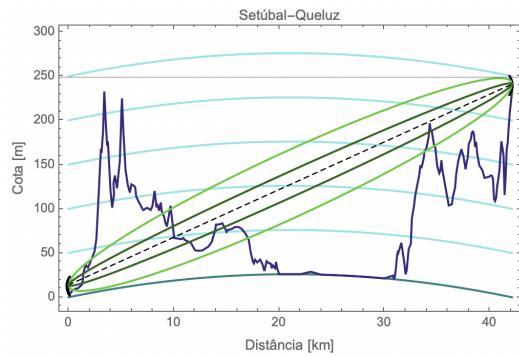
De modo a melhorar a relação sinal/ruído é introduzida a diversidade. Na diversidade, interessa não só utilizar distribuições tão realista quanto possível para o desvanecimento rápido como, também, definir a distância entre antena necessária para conseguir uma diversidade efectiva. A diversidade de espaço impõe a existência de percursos independentes entre as antenas terminais. Em percursos com repetidores passivos é condição necessária o recurso a repetidores passivos distintos. Acresce que as antenas terminais devem ter directividade suficiente para descriminar os repetidores passivos. Estes factores restringem fortemente o interesse da diversidade de espaço em percursos com repetidores. Assim, uma vez que a ligação dispõe de antenas emissoras/receptoras parabólicas e o repetidor introduzido é do tipo espelho plano, todas as condições para a implementação da diversidade estão cumpridas.

# Capítulo 4: Análises de Percurso

O percurso é o elemento determinante de uma ligação por feixes hertzianos e, simultaneamente, aquele que apresenta maior dificuldade para a apresentação, sem recurso a uma casuística extensa. A escolha do percurso foi feita tentativa erro, tendo avaliado em termos de custos e da fiabilidade de propagação que está associada a cada um. Deste modo a partir do Google Earth, obtivemos, o que achamos o melhor, percurso para a ligação de feixes hertzianos entre Setúbal e Queluz, apresentada na figura (a). Relativamente aos repetidores estudaram-se dois casos, no primeiro repetidor passivo estudou-se a hipótese de ter um espelho plano. No segundo repetidor passivo estudou-se a hipótese de ter um repetidor costas-com-costas.



(a) Representação do percurso em estudo(Google Earth).



(b) Representação do percurso em estudo com a 1ºElipsóide de Fresnel

## 4.1 Raio directo

Da análise do perfil do percurso Setúbal-Queluz sabe-se que o percurso do raio directo é a opção com um menor custo possível e com menor valor da atenuação atmosférica porque o caminho deverá ser mais curto. Porém não é um percurso concretizável, uma vez que há a interrupção total do 1º Elipsóide de Fresnel provocando a existência de uma elevada atenuação por obstáculos como podemos ver na figura 4.2

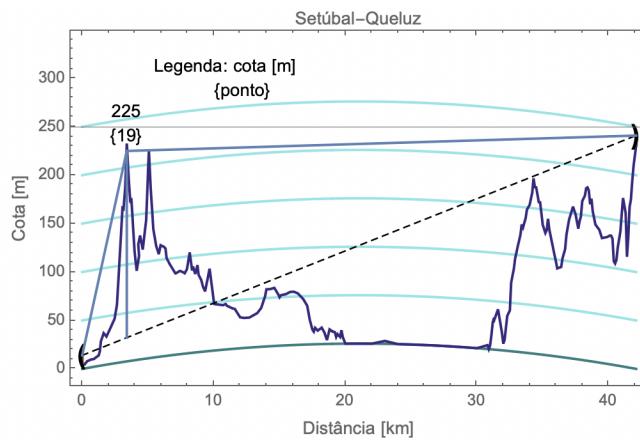


Figura 4.2: Raio directo entre a antena emissora e receptora, tendo em consideração o obstáculo principal.

Com o recurso ao **Feixer** foi possível calcular a atenuação provocada pelos obstáculos através do método de **Deygout**. Assim, para uma frequência de **13 GHz** a atenuação por obstáculos é  $A_{obs} = 43.3806$  concluindo assim que é necessário o recurso a repetidores de forma a garantir qualidade na ligação por feixes hertzianos.

## 4.2 Repetidor activo

A utilização de um repetidor activo não se justifica no percurso em estudo, uma vez que as distâncias entre terminais é inferior a 50 Km. O que nos levaria a ter custos muito mais elevados.

## 4.3 Repetidor passivo

Segundo a análise do percurso conclui-se que seria necessário o recurso a um repetidor de forma a garantir a qualidade da ligação. Após a exclusão do repetidor activo foram formuladas várias hipóteses para o tipo de repetidor passivo.

### 4.3.1 Repetidor passivo Costas-com-Costas

Sabe-se que o ganho pode ser uma métrica para a avaliação do tipo de repetidor a implementar quanto à qualidade da ligação. Posto isto, foi calculado o ganho para um repetidor costas-com-costas segundo a equação 4.1. Ressalve-se que foi assumido como desprezável a perda nas guias entre as antenas costas com costas.

$$G_{costas-com-costas} = 2 \times G_{parabólica} = 2 \times [20\log_{10}\left(\frac{\pi d_a f_{[MHz]}}{300}\right) + 10\log_{10}(\eta)] = -13.7dB \quad (4.1)$$

Dado que o ganho do repetidor é um valor negativo, sabemos que este é um tipo de repetidor a não considerar por só iria piorar a relação sinal-ruído.

### 4.3.2 Repetidor passivo Espelho plano

Avaliando agora a possibilidade do uso de um repetidor passivo espelho plano para a ligação em estudo procedeu-se ao cálculo do ângulo de incidência com os dados do perfil do percurso, como podemos ver na figura 4.3 e através da equação 4.2

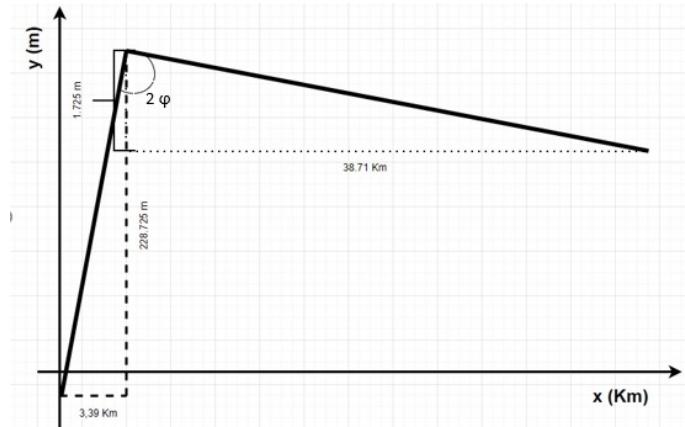


Figura 4.3: Perfil do percurso com repetidor passivo, costas com costas.

$$2\phi = \theta_1 + \theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{228.725}{\sqrt{1.725^2 + 38710^2}}\right) = 89.66 \quad (4.2)$$

Ainda para o dimensionamento do repetidor foi necessário recorrer a cálculos auxiliares para obter o perfil de linha em cada ponto recorrendo à equação 4.3.

$$y = -\frac{x - \frac{d}{2}}{2r}; r = 8493.33(3)Km \quad (4.3)$$

obtendo

	Ponto A (Terminal)	Ponto B (Repetidor)	Ponto C (Terminal)
<b>Distância</b>	0 m	3390 m	42100 m
<b>Cota</b>	4 m	225 m	231 m
<b>Y</b>	-26.085 m	-18.36 m	-26.085 m
<b>Mastros</b>	10 m	10 m	10 m
<b>Cota + mastros + Y</b>	-12.085 m	216.64 m	214.915 m

Figura 4.4: Representação dos ângulos de fogo

Desta forma, é necessário calcular a área eficaz que é relacionada pela área física do espelho plano  $a$ , e o ângulo de incidência  $\phi$ , dado pela equação 4.4 :

$$a = \frac{a_{ef}}{\cos(\phi)} = \frac{30.7055}{\cos(44.83)} = 43.29m^2 \quad (4.4)$$

Nota-se que este valor de incidência não é muito eficaz, pois para ter a  $a_{ef} = 30.7055$  temos de implementar um espelho com  $43.29m^2$ . Por fim, o ganho do repetidor é dado por:

$$G_{rep} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{\lambda^2}a_{ef}\right) + 10\log_{10}(\eta_{rep}) = 116.97dB \quad (4.5)$$

Por fim, concluímos que a implementação deste repetidor é muito mais vantajoso em relação ao repetidor de parabólicas costas-com-costas porque o seu ganho é consideravelmente maior.

#### 4.3.3 Repetidor passivo Associação de Espelhos

Embora os valores sejam satisfatórios para o uso de um repetidor de espelho plano, surgiu a hipótese de testar o ganho do repetidor de associação de espelhos a fim de ver se o ganho do mesmo seria consideravelmente maior. Deste modo, pela figura 4.5 é possível ver o perfil do percurso com o recurso a um repetidor da associação de dois espelhos.

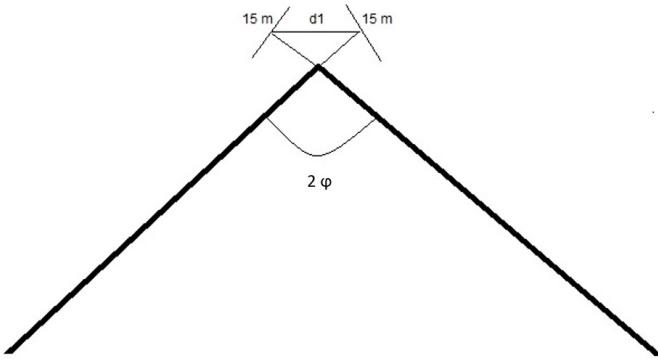


Figura 4.5: Perfil representativo da associação de dois espelhos

Recorrendo à geometria podemos calcular a distância  $d_1$  recorrendo à equação 5.3 a fim de obter o factor correctivo a aplicar ao ganho.

$$d_1 = \frac{15 \times 2}{\sin(44.83)} = 42.55m^2 \quad (4.6)$$

Assim é possível obter o valor de k:

$$\frac{1}{k} = \frac{2\lambda d_1}{a_{ef}} \quad (4.7)$$

Para que esta opção de implementação do repetidor passivo de associação de espelhos seja solução para o aumento do ganho do sistema é necessário que o rácio  $\sqrt{\frac{b_{ef}}{a_{ef}}} = 2$ , pelo que a área do espelho a implementar teria de ser muito maior do que no repetidor passivo espelho plano, que é de  $42,55 m^2$ . Em suma, apesar de conseguirmos um ganho muito maior com o recurso a este repetidor não será certamente a decisão correta para o projecto uma vez a área de espelho necessária para obtermos um ganho consideravelmente maior acarreta custos consideravelmente maiores, o que não é o pretendido, uma vez que com um só espelho conseguimos cumprir todas as normas a um preço acessível.

#### 4.4 Ângulo de fogo

A partir da equação 5.9 obtemos o ângulo da horizontal

$$\theta = \tan\left(\frac{x_0 - x}{r}\right) \quad (4.8)$$

Para obter o ângulo de incidência do terminal receptor  $i_R$  é necessário recorrer ao ângulo  $\alpha$  e a equação 5.6 obtemos o ângulo de incidência do terminal emissor  $i_E$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{38710}{1.725}\right) = 89.99deg \quad (4.9)$$

$$i_R = 180 - \alpha - 90 = 180 - 89.99 - 90 = 0.01deg \quad (4.10)$$

$$i_E = 90 - \cos^{-1}\left(\frac{206.64}{3390}\right) = 3.5deg \quad (4.11)$$

Pelo que os ângulos de fogo da ligação são, como podemos observar pela figura 4.6:

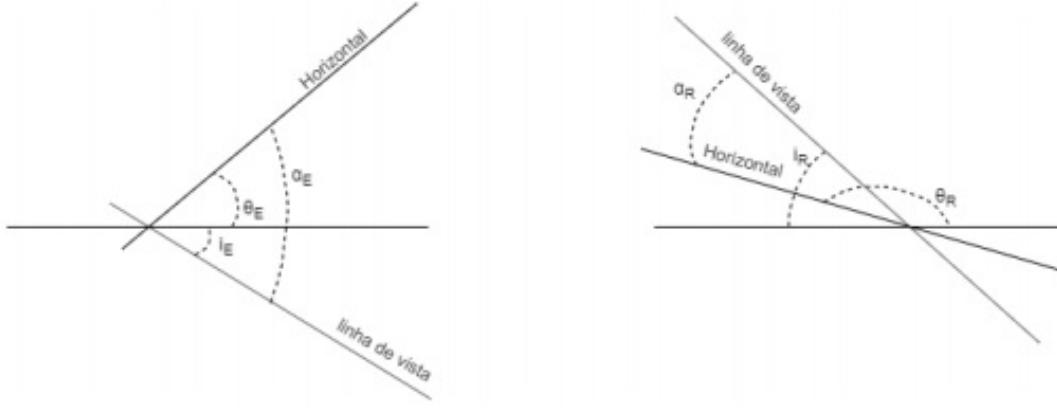


Figura 4.6: Representação dos ângulos de fogo

$$\alpha_E = \theta_E + i_E = 0.023 + 3.5 = 3.523deg \rightarrow \text{abaixo da horizontal} \quad (4.12)$$

$$\alpha_R = \theta_R + i_R = 0.26 + 0.01 = 0.27deg \rightarrow \text{acima da horizontal} \quad (4.13)$$

Na prática os resultados dos ângulos de fogo foram satisfatórios uma vez seriam possíveis de implementar.

# Capítulo 5: Análises de Custo

O custo do investimento inicial, inclui o custo do equipamento, custo das infraestruturas (terreno, edifícios, acessos, fornecimento muito fiável de energia), neste projecto admite-se que os encargos com os terrenos e direitos de passagem são nulos. O custo do equipamento radioeléctrico de um terminal digital, numa configuração 1+1, incluindo emissor e receptor, modem para 34 Mb/s e unidade de comutação é da ordem dos 35000. Tendo em conta também o custo de abrigo de 60000 euros. Deste modo, Considerando os custos apresentados no livro e a frequência de trabalho F=13 GHz, obtemos os seguintes resultados para o custo inicial.

Descrição		Tipo	valor	$Q_{td}$	Função do Custo	Custo (euros)
Antenas	emissor	d(m)	3	1	$1000 + 75d^3$	3025
	recetor		3	1	$1000 + 75d^3$	3025
	repetidor		$S=43.29m^2$	1	$2500 + 750(s-5)$	31217.5
Torres Espiada	emissor	h(m)	10	1	$3500 + 300h$	6500
	recetor		10	1		6500
	repetidor		10	1		6500
Guias	emissor	h(m)	10	1	$15 \times (1 + \frac{10}{f})$	265.3
	recetor		10	1		265.3
	repetidor		10	1		265.3
Emissor + recetor			2		35000	70000
Abrigo e sistema de alimentação	emissor			1		60000
	recetor			1		60000
	repetidor			1		60000
Custo inicial						307563.4

Figura 5.1: Custos para f = 13GHz

Quanto ao custo de exploração total consiste nos encargos de exploração anuais iguais a 15% do custo do investimento inicial mais a taxa de utilização anual de acordo com o definido pela ANACOM. A equação 4.2 dá-nos o Custo anual  $C_{anual}$ , onde  $C_{inicial}$  corresponde ao custo do investimento inicial,  $C_{banda/ano}$  a taxa de utilização anual dada pela ANACOM, cálculo encontra-se em (Anexo-Fig-9.1).

Deste modo obtemos um custo anual de:

$$C_{anual} = 0.15 * C_{inicial} + C_{banda/ano} = 0.15 * 307563.4 + 5541.14 = 51675.65\text{euros} \quad (5.1)$$

A taxa de utilização anual é calculada considerando o feixe como uma ligação bidirecional cocanal, ou seja, apresenta uma segunda ligação hertziana no mesmo trajeto com recurso a polarização cruzada. Pela equação 5.2, obtemos custo de exploração total de 25 anos.

$$C_{total} = C_{inicial} + 25 * C_{anual} = 1599454.65 euros \quad (5.2)$$

Para o calcular o custo de uma chamada de 3 minutos ao longo de 25 anos, é preciso conhecer o valor líquido actual ou o fluxo total de tesouraria a preços constantes, que é dado pela equação 5.3.

$$val = \sum_{i=1}^m \frac{r_i - d_i}{(1 + \frac{j}{100})^{t_i}} \quad (5.3)$$

As variáveis da equação 5.3 são: m que corresponde a 25 anos,  $r_i$  que é a receita (com i variando de 1 a m) gerada em  $t_i$  (anos),  $d_i$  corresponde ao custo de exploração anual e j à taxa interna de retorno a preços constantes de 10%.

Sabendo que a receita gerada num ano é dada pela equação 5.4

$$r_i = n * Ttel * \frac{N}{3} * C_3 \quad (5.4)$$

Onde n corresponde ao número de canis (960), Ttel é o tráfego médio por canal telefónico igual a  $(0.2 + 0.02 * t_i$  (anos)) Erlang, N corresponde ao número total de minutos num ano e  $C_3$  corresponde ao custo médio de uma chamada com duração de 3 minutos no ano  $t_i$ . O custo de exploração anual  $C_{anual}$  ou  $d_i$  é fornecido pela equação 5.1. Uma vez que o valor residual é nulo, o fluxo total da tesouraria ao fim de 25 anos deve ser igual ao investimento inicial do:

$$N = 365.25 dias * 24 meses * 60 minutos = 525960 minutos \quad (5.5)$$

$$d_0 = \sum_{i=1}^m \frac{r_i - d_i}{(1 + \frac{j}{100})^{t_i}} \quad (5.6)$$

Para normalizar os resultados brutos de exploração, face à despesa inicial, utiliza-se o período de recuperação do investimento  $t_r$  dado pela equação 5.7, igualando este valor com a equação 5.6, obtemos a equação 5.8, onde tir corresponde à taxa interna de retorno a preços constantes j para um valor residual nulo.

$$t_r = \frac{d_o}{r_i + d_i} \quad (5.7)$$

$$t_r = \sum_{i=1}^m \frac{1}{(1 + \frac{tir}{100})^{t_i}} = 9.07 anos \quad (5.8)$$

Finalmente chegamos a equação 5.9, onde calculamos o custo médio de uma chamada de 3 minutos ao longo dos 25 anos, onde a inflação é 2%.

$$C_3 = \frac{r_i}{n * T_{tel} * \frac{N}{3}} = \frac{\frac{d_0}{tr} + d_i}{n(0.2 + 0.02 * t_i(anos))\frac{N}{3}} \left(1 + \frac{inflação}{100}\right)^{t_i(anos)} \quad (5.9)$$

Recorrendo ao Matlab calculou-se a evolução do custo médio de uma chamada de 3 minutos ao longo dos 25 anos, apresentado no gráfico seguinte.

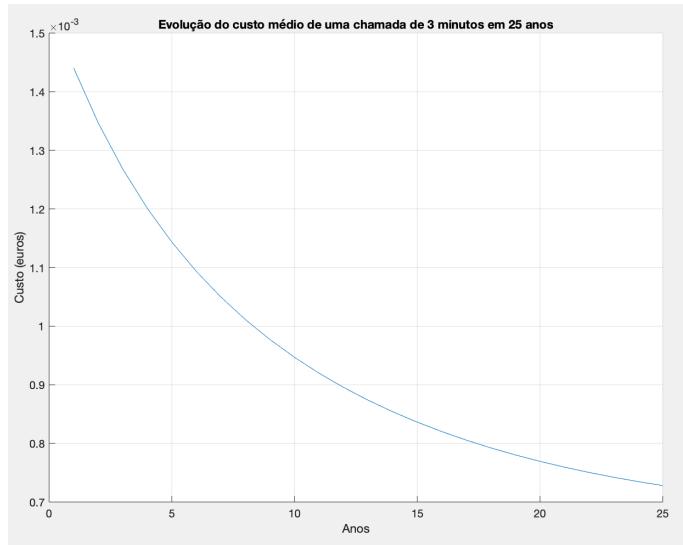


Figura 5.2: Evolução do custo médio de uma chamada de 3 minutos em 25 anos

# Capítulo 6: Solução final

Como solução final do projecto de uma ligação de feixes hertzianos entre Setúbal e Queluz, optou-se pela utilização de um repetidor espelho plano com uma frequência de 13 Ghz. Em resumo nas tabela seguinte encontra-se em detalhe todos os parâmetros e valores relevantes na ligação.

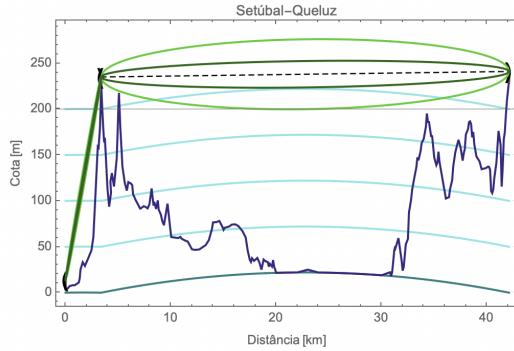


Figura 6.1: Solução final com repetidor passivo espelho plano (1ºElipsóide de Fresnel).

Antena	Latitude/Longitude	Altitude	Altura do mastro	Guias	Diâmetro	Rendimento da abertura das antenas	Área efetiva
Emissora	38°31'44.48"N/8°53'15.81"O	4m	10m	10m	3	0.55	-
Receptora	38°45'52.99"N/9°15'54.29"O	232m	10m	10m	3	0.55	-
Repetidor(passivo)	38°32'54.97"N/8°55'08.00"O	225m	10m	10m	3	0.95	43.29m <sup>2</sup>

Figura 6.2: Características das Antenas.

Guias	Espaço Livre	Atmosfera	Obstáculo	Hidrometeoritos (V)	Hidrometeoritos (H)
2.25 dB	271.8 dB	1.8 dB	0 dB	32.86 dB	39.36 dB

Figura 6.3: Características das Antenuações.

Com os dados relativos destas tabelas e do Feixer, obtemos uma potência de emissão= -6.37762 dBW e uma potência de recepção= -64.9455 dBW.

Canais	Débito binário	Modulação	L <sub>b</sub>	B <sub>rf</sub>	Factor de excesso
960	34 Mbit/s	4-QAM	28 Mhz	18.7 Mhz	0.1

Figura 6.4: Características do sinal digital.

Para uma ligação de sinais Digitais não usando diversidade, verificamos através dos feixes que nem todas as cláusulas da ITU eram cumpridas. Deste modo recorremos a diversidade do espaço obtendo um valor para a margem selectiva de 62.2 dB, e cumprindo todas as cláusulas. Obtendo uma relação sinal-ruído em condições ideias de propagação de 57.38 dB, uma margem critica de 14.7144 dB. Os gráficos relativos à margem critica e à relação sinal-ruído necessária para cumprir as recomendações encontram-se em (Anexo- Fig-9.2 e 9.3).

# Capítulo 7: Conclusão

Dados os objectivos descritos na secção da introdução, pode-se concluir que estes foram compridos. Obteve-se resultados satisfatórios, implementáveis e que cumprem as normas aplicadas a sistemas de telecomunicações digitais por feixes hertzianos. Para tal foram estudadas várias alternativas para o perfil do percurso, tipo de repetidor e frequência a utilizar considerando sempre as piores condições para que a solução fosse o mais fiável possível. Na secção "Solução final" são apresentados os resultados do dimensionamento da ligação Setúbal-Queluz e a evolução dos custos de uma chamada de três minutos ao longo de 25 anos. Este projecto demonstrou ser de muito interesse uma vez que se assemelha ao trabalho de planeamento e dimensionamento de uma ligação de telecomunicações e que portanto, foi uma boa ferramenta para a nossa formação.

# **Capítulo 8: Referências**

[1]-Salema, Carlos (2011), 3a Edição, Feixes Hertzianos, IST Press

[2]- <https://www.anacom.pt/>

[3]- [https://www.anacom.pt/streaming/anexo1\\_planificacoes.pdf](https://www.anacom.pt/streaming/anexo1_planificacoes.pdf).

# Capítulo 9: Anexos

Taxa anual aplicável pela ligação hertziana ponto-ponto bidirecional e por canal consignado:									
Faixa de frequências [GHz]	1 - 3	4 - 11	12 - 15	18 - 24	25 - 38	47 - 59	61 - 71	71 - 74	
Comprimento mínimo da ligação (L, min)	n.a.	10 km	5 km	2 km	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Taxa per megahertz [€]	48,5 <sup>+</sup> · L <sub>km</sub>	57,5 <sup>+</sup> · L <sub>km</sub>	65,5 <sup>+</sup> · L <sub>km</sub>	15,5 <sup>+</sup> · L <sub>km</sub>	12,7 <sup>+</sup> · L <sub>km</sub>	8,6 <sup>+</sup> · L <sub>km</sub>	4,5 <sup>+</sup> · L <sub>km</sub>	0,85 <sup>+</sup> · L <sub>km</sub>	
Código da taxa	143101	143102	143103	143104	143105	143106	143107	143108	

- As ligações ponto-multiponto são constituídas por um conjunto de ligações ponto-ponto. Neste particular, a taxa a aplicar resultará do somatório das taxas calculadas para cada uma das suas ligações ponto-ponto;
  - Uma segunda ligação hertziana, cocanal, no mesmo trajecto e com recurso a polarização cruzada, será objecto de uma redução de 50% sobre o valor da taxa aplicável;
  - As ligações hertzianas unidireccionais serão objecto de uma redução de 25% sobre o valor da taxa aplicável às ligações bidireccionais;
  - É fixado em € 50 o valor mínimo da taxa de utilização aplicável por ligação e por canal consignado.

#### - Cálculo de taxas de utilização de frequências:

Figura 9.1: Cálculo da taxa de aluguer da banda por ano à ANACOM para 13 GHz.

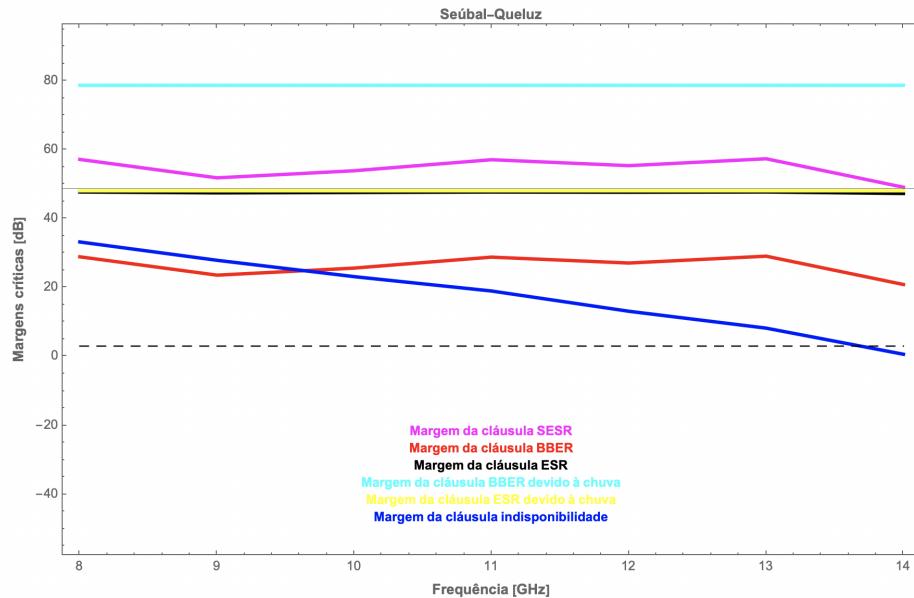


Figura 9.2: Margem critica.

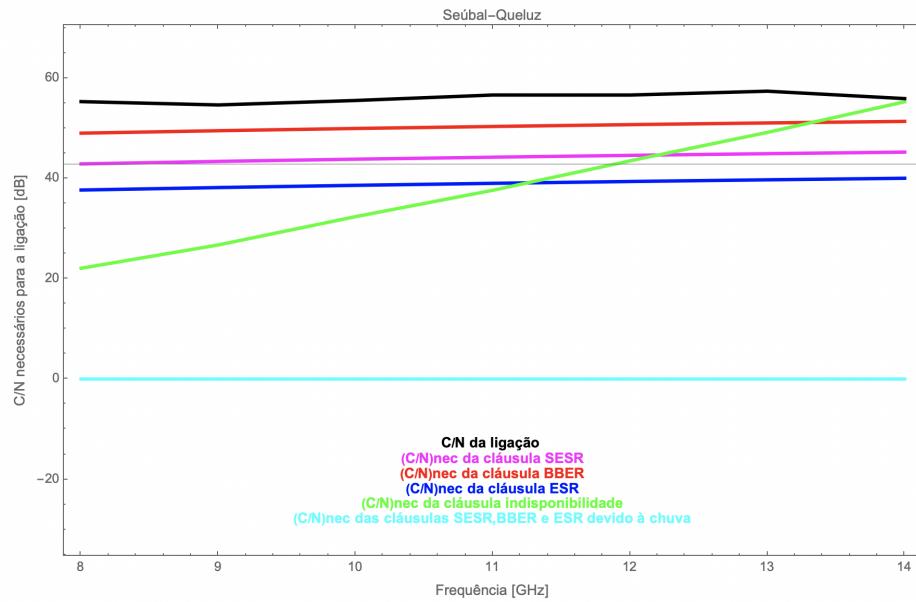


Figura 9.3: C/N necessaria para cumprimento da ligacao.

## 9.1 Pontos da Ligação (distância(Km) cota(m))

35.3 129/ 35.4 141/ 35.5 130/ 35.7 117/ 35.9 104/ 36.0 98/ 36.1 91/ 36.4 93/ 36.5 102/ 36.7 112/ 36.8 127/ 37.0 143/ 37.3 157/ 37.5 149/ 37.6 142/ 37.7 135/ 37.8 143/ 37.9 148/ 38.0 164/ 38.2 170/ 38.3 178/ 38.4 179/ 38.5 176/ 38.6 162/ 38.7 168/ 38.8 155/ 39.0 142/ 39.3 137/ 39.5 129/ 39.7 130/ 39.9 131/ 40.1 133/ 40.2 133/ 40.3 130/ 40.4 107/ 40.5 105/ 40.6 109/ 40.7 122/ 40.9 139/ 41.0 157/ 41.1 174/ 41.3 159/ 41.4 114/ 41.5 135/ 41.6 166/ 41.7 174/ 41.8 193/ 41.9 209/ 42.0 220/ 42.1 231/