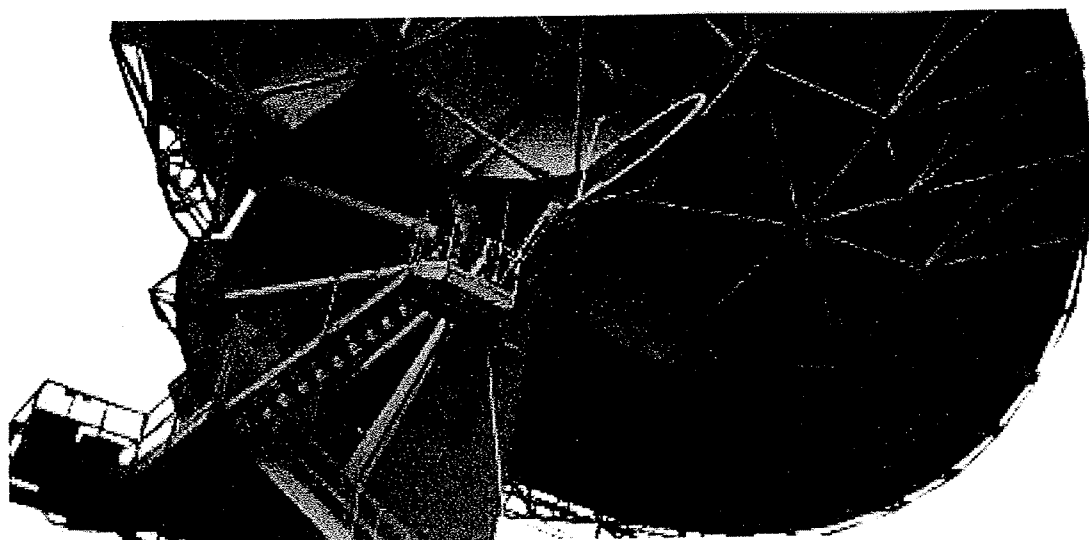




INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO



Projecto de uma Ligação por Feixes Hertzianos

Índice

1. Introdução	2
2. Parâmetros da Ligação	3
2.1. Plano de Frequências	3
2.2. Diversidade.....	5
2.3. Desvanecimento.....	6
2.4. Desvanecimento selectivo e igualação.....	6
2.5. Atenuação atmosférica.....	7
2.6. Atenuação devido a hidrometeoritos.....	7
2.7. Reflexões no terreno.....	8
2.8. Indisponibilidade.....	9
2.9. Fiabilidade.....	9
2.10. Repetidor Passivo.....	9
2.11. (C/N) Óptimo.....	10
3. Análise de percursos.....	10
3.1. Possibilidades de ligação.....	10
3.2. Ligação directa entre Barreiro e Sesimbra.....	11
3.3. Ligação com repetidor passivo em Santana com recurso a diversidade no espaço.....	12
3.4. Ligação com repetidor activo em Santana sem recurso a diversidade no espaço.....	15
3.5. Ligação com desvio na Serra do Zambujal, com recurso a repetidor passivo e diversidade no espaço.....	19
4. Análise de custos.....	23
5. Solução final.....	25
5.1. Cálculo da semi-banda.....	25
5.2. Especificações da banda escolhida.....	26
5.3. Análise da fiabilidade.....	27
Anexo A – Cálculo da assinatura.....	29
Anexo B – Cálculo do ganho dos vários repetidores passivos.....	30
Anexo C – Evolução do custo de uma chamada de 3 minutos.....	32
Anexo D – Cálculo dos azimutes e dos ângulos de fogo das antenas.....	35

1. Introdução

Neste trabalho pretende-se projectar uma ligação bidireccional de feixes hertzianos digitais entre Barreiro e Sesimbra, para um sinal STM-1(155Mbit/s) que suporta tráfego telefónico correspondente a um máximo de 1920 canais e que garanta as especificações da ITU-R.

Para cumprir estas condições serão analisados vários percursos, a necessidade de recorrer à utilização de repetidores passivos ou activos, a banda de frequência a utilizar e as características dos elementos físicos (altura dos mastros, diâmetro e orientação das antenas, etc).

O objectivo final será, de entre as várias análises efectuadas, obter aquela que nos permita ter um custo médio mais baixo para uma chamada telefónica bi-direccional com uma duração de 3 minutos, sem comprometer a qualidade e fiabilidade da ligação, e cumprindo as cláusulas definidas pela ITU-R.

Para a realização desta análise, além da bibliografia da cadeira, foram também utilizados os seguintes elementos:

- Cartas topográficas presentes no laboratório de telecomunicações, com uma escala de 1:25000, que permitem a obtenção do perfil da ligação
- Script Feixer do programa Mathematica, que permite a verificação do cumprimento das cláusulas da ITU-R, bem como vários outros parâmetros inerentes ao estabelecimento da ligação
- Programa Google Earth, que nos fornece coordenadas geográficas com precisão e nos permite obter um perfil da ligação em escala deformada

- Especificações do Projecto

Terão que ser cumpridas algumas condições pré-definidas no enunciado do projecto, nomeadamente:

- Valor máximo da potência do emissor: $p_m = \frac{3}{f^{1.2}}$, com f em Ghz
- Factor de ruído do receptor: $F = 5 + (0.2 \times f)$, com f em Ghz

- Encargos de exploração anuais, iguais a 0.15 do custo inicial;
- Encargos nulos com terrenos e direitos de passagem
- Taxa de utilização anual de acordo com o definido pela ANACOM no endereço <http://www.anacom.pt/render.jsp?categoryid=336153#4>
- Duração do projecto de 25 anos
- Valor residual nulo
- Tráfego médio por canal telefónico igual a $(0.2 + 0.02 \cdot t[\text{anos}])$ Erlang
- Taxa interna de retorno (a preços constantes) de 10%
- Taxa de inflação de 3%

2. Parâmetros da ligação

Neste ponto do trabalho são analisados os vários parâmetros escolhidos para configurar as várias ligações, bem como uma explicação sucinta sobre o motivo de escolha dos mesmos.

2.1. Plano de frequências

A escolha da frequência de trabalho é sem dúvida um dos parâmetros mais difíceis e ao mesmo tempo, importantes, de definir. É necessário ter em conta as várias bandas de frequência disponíveis para utilização, definidas pela ITU-R, bem como a respectiva largura de banda e possível modulação. Regra geral, uma menor largura de banda corresponde a menores custos, logo, num caso de termos duas larguras de banda diferentes para a mesma banda de frequências, será escolhida aquela que tiver um valor inferior.

Há que salientar que a partir de um determinado valor elevado de frequência, o projecto torna-se mais difícil de realizar pois são necessários componentes mais dispendiosos, de modo que aqui não foram consideradas viáveis as opções de bandas acima dos 15Ghz. Além disso salienta-se também que um aumento de frequência corresponde a uma menor potência no emissor, a uma maior atenuação de espaço livre, maior atenuação atmosférica e maior factor de ruído no receptor.

Foi consultado o anexo A do livro “Feixes Hertzianos” que contém os planos detalhados de frequência e procedeu-se a uma análise sobre a viabilidade dos vários planos existentes relativamente ao nosso projecto.

Ficaram desde logo excluídas as seguintes bandas de frequência:

- **Banda dos 2GHz:** Destinada a feixes analógicos e digitais com um ritmo de até 77Mbit/s, bastante aquém do necessário no projecto.
- **Banda dos 7GHz:** Indicada para feixes analógicos com capacidade de 60, 120 ou 300 canais telefónicos
- **Bandas dos 8Ghz:** Destinada a feixes hertzianos analógicos ou digitais de média e baixa capacidade
- **Banda dos 10Ghz:** Indicada para feixes digitais de pequena capacidade, até 8Mbit/s
- **Banda dos 15Ghz:** Reservada para feixes hertzianos digitais de baixa e de média capacidade

Ficamos então com as seguintes opções:

f [GHz]	Modulação	b_{orf} [MHz]	b_{rf} [MHz]	m	β
4	256-QAM	29	26.36	66.33	0.1
5	512-QAM	20	18.18	437.9	0.1
6	32-PSK/64-QAM	40	36.36	20.93	0.1
	512-QAM	20	18.18	437.9	0.1
	64-QAM	29.65	26.95	60.51	0.1
	32-PSK/64-QAM	40	36.36	20.93	0.1
	8-PSK/16-QAM	60	54.55	7.59	0.1
11	32-PSK/64-QAM	40	36.36	20.93	0.1
13	256-QAM	28	25.45	77.06	0.1

Tabela 1 – Bandas de frequências disponíveis para a ligação

Os valores desta tabela foram obtidos através do Feixer e com recurso às seguintes fórmulas:

$$b_{rf} = \frac{f_b}{\log_2 m} \beta = \frac{b_{orf}}{b_{rf}} - 1 m = \frac{R}{b_{rf}} = \frac{R}{\frac{b_{orf}}{(1+\beta)}}$$

sendo que f_b corresponde ao débito binário bruto que nosso caso corresponde a 159,52Mbit/s.

b_{rf} e b_{orf} correspondem à largura de banda em radiofrequência e à ocupação do espectro de radiofrequência, respectivamente. β é o factor de excesso de banda de Nyquist, com valores compreendidos entre 0.1 e 0.5 e m é o número de níveis por palavra que irá determinar qual o tipo de modulação passível de ser utilizada.

Considerámos inicialmente o valor de $\beta = 0.1$, e após calcular o número de níveis e a modulação a utilizar, determinámos o valor efectivo de β considerado.

Considera-se também, para o mesmo número de níveis por palavra, a utilização de modulação QAM em vez de PSK, pois para a mesma probabilidade de erros a relação sinal-ruído é maior no caso da modulação PSK.

Mesmo nos casos em que podemos escolher entre 32-PSK ou 64-QAM, será preferível esta última, pois não só apresentam níveis de C/N muito semelhantes para a mesma probabilidade de erro, como também no caso em que utilizamos um maior número de níveis, b_{rf} será menor, e consequentemente, como se utiliza menos largura de banda, será uma opção em princípio mais económica.

Neste caso, o factor de excesso de banda será também maior, o que conduzirá a um filtro relativamente mais económico e fácil de implementar.

Relativamente à frequência de 6GHz, temos duas bandas que utilizam potencialmente o mesmo tipo de modulação: a banda de 29.65Mhz e a banda de 40Mhz. Embora seja possível utilizar modulação 32-PSK para o caso da banda de 40Mhz, por razões já referidas anteriormente, utiliza-se preferencialmente modulação 64-QAM. Por este motivo, considerámos apenas a largura de banda de 29.65Mhz para esta modulação, pois por ser menor, será financeiramente mais viável.

Não se consideraram os planos de frequência em que seria necessário utilizar uma modulação superior a 64-QAM, pois não só esta apresenta níveis de erro mais elevados, como no nosso caso, nunca foi possível obter valores viáveis da margem de ligação, mesmo com todos os parâmetros optimizados e com utilização de diversidade.

f [GHz]	Modulação	b_{orf} [MHz]	b_{rf} [MHz]	m	β
5	64-QAM	40	26.59	64	0.504
6	64-QAM	29.65	26.59	64	0.115
	8-PSK	60	53.17	8	0.128
	16-QAM	60	39.88	16	0.505
11	64-QAM	40	26.59	64	0.504

Tabela 2 – Frequências e respectivas larguras de banda a serem testadas

2.2. Diversidade

Para combater os efeitos do desvanecimento, somos confrontados com várias opções. Duas delas são aumentar a potência do emissor e os ganhos das antenas, no entanto, estas opções nem sempre são economicamente e/ou tecnicamente viáveis (e no nosso caso constituem uma restrição do projecto).

Podemos então recorrer ao uso de diversidade. No caso em que o sinal é recebido por várias antenas distanciadas entre si, a diversidade é designada de diversidade de espaço. Quando os sinais, com frequências diferentes, são recebidos apenas por uma antena, refere-se então à diversidade de frequência.

Neste projecto será, caso necessário, utilizada a diversidade de espaço, visto que esta opção é economicamente bastante mais viável que a diversidade de frequência (pois o espectro de frequência é caro), com excepção nos casos em que se utilizam antenas de muito grandes dimensões.

2.3. Desvanecimento

Numa ligação entre dois pontos, há que ter em conta que o meio em que essa ligação se encontra possui características que variam continuamente no tempo, e como tal, mesmo mantendo a potência de emissão constante, é normal que se verifiquem alterações no sinal recebido. Estas alterações são resultado de um fenómeno designado por desvanecimento, ou em inglês "*fading*". Existem dois tipos de desvanecimento, lento e rápido.

De modo a poder verificar os efeitos do desvanecimento na nossa ligação é necessário estabelecer alguns parâmetros que a caracterizam neste campo.

- Trata-se de uma ligação terrestre, pois apesar da maior parte dos pontos ter uma cota inferior a 100m, existem elevações com cota superior a esta entre o percurso e a linha de costa;
- A menor das cotas das antenas terminais está entre 0 e 400m, (mais propriamente) e o terreno é classificado como colina, logo considera-se $C_0=3.5$;
- $C_{long}=3$;
- $C_{lat}=0$;
- Latitude média = 38°

2.4. Desvanecimento selectivo e igualação

Nos feixes hertzianos digitais, o desvanecimento é responsável por reduzir a potência do sinal recebido e aumentar a taxa de erros binários.

O impacto deste fenómeno pode ser avaliado através da assinatura de um sistema, que caracteriza o mesmo em relação ao desvanecimento selectivo (quanto menor for a área da assinatura, menores serão os valores da atenuação devido a este factor).

Existem várias abordagens possíveis no que toca à redução da área da assinatura: igualação adaptativa no domínio da frequência, igualação adaptativa no domínio do tempo e associação de igualadores adaptativos nos domínios da frequência e do tempo.

No entanto, uma igualação apenas no domínio da frequência é considerado bastante dispendioso, pois o espectro de frequência é caro, logo, no nosso projecto foi

considerada uma associação de igualadores nos dois domínios com fase mínima de 490° e com fase não mínima de 35°.

O cálculo da assinatura encontra-se no Anexo A.

2.5. Atenuação atmosférica

O valor da atenuação atmosférica, causado principalmente pelo oxigénio e vapor de água, é normalmente desprezável para frequências inferiores a 1Ghz, enquanto que para frequências entre 1 e 20Ghz não excede, em geral, 1dB. Excepcionalmente, caso esteja a chover, para frequências superiores a 10Ghz os valores de atenuação já poderão ser apreciáveis.

Para o caso de Portugal, têm-se como referência os seguintes valores:

<i>Portugal</i>	<i>Temperatura [°C]</i>	<i>Humidade [%]</i>	<i>ρ [g/m³]</i>
<i>Inverno</i>	10	85	7.3
<i>Verão</i>	25	50	11.3

Tabela 3 – Valores típicos de temperatura e humidade para Portugal

Foram considerados os valores para o pior caso, usados por defeito no Feixer, para uma temperatura de 25°C e humidade relativa de 85%.

2.6. Atenuação devido a hidrometeoritos

A precipitação provoca absorção, dispersão e alterações na polarização das ondas radioelétricas. Como já foi referido anteriormente, esta influência verifica-se em particular para frequências mais elevadas e também quando a quantidade de precipitação é mais elevada.

Há que ter em conta que o coeficiente de atenuação é diferente para polarização horizontal e vertical, caso as gotas de chuva não tenham forma esférica, o que se verifica na realidade (possuem uma forma aproximadamente elíptica).

Os valores da atenuação devido à polarização horizontal são mais elevados, logo, serão os considerados, de modo a termos em conta o pior caso possível e estabelecer assim uma margem segura para a ligação.

Foi considerada uma intensidade de precipitação anual de 42mm/h para uma fracção de tempo anual de 0,01%.

2.7. Reflexões no terreno

Numa ligação entre dois pontos, em que o elipsóide de Fresnel entre esses mesmos pontos se encontra desimpedido, a antena de recepção, além da potência p_d (potência de raio directo) irá receber uma fracção de potência emitida p_s que é reflectida ou dispersa no terreno.

O objectivo é que a relação p_s/p_d seja sempre menor que -10dB, de modo a que se garanta que a probabilidade de interferência devido ao sinal reflectido não tenha uma influência significativa no sinal recebido.

Para tal, existem vários factores que poderão alterar esta relação, tal como a altura dos mastros das antenas de emissão e recepção, o ganho das antenas (tornando-as mais directivas) e em último caso, a posição das antenas e/ou repetidores.

No nosso caso, caracterizámos os troços da ligação em relação à rugosidade da seguinte forma:

Percorso Barreiro-Sesimbra com recurso a repetidor na serra do Zambujal:

- Pontos 1 a 2: $s = 0.1$, terreno difusor
- Pontos 2 a 3: $s = 0.001$, terreno reflector
- Pontos 3 a 82: $s = 0.1$, terreno difusor

Percorso Barreiro-Sesimbra com recurso a repetidor passivo em Santana:

- Pontos 1 a 4: $s = 0.1$, terreno difusor
- Pontos 5 a 6: $s = 0.001$, terreno reflector
- Pontos 7 a 66: $s = 0.1$, terreno difusor

Percorso Barreiro-Sesimbra com recurso a repetidor activo em Santana:

- Pontos 1 a 4: $s = 0.1$, terreno difusor
- Pontos 5 a 6: $s = 0.001$, terreno reflector
- Pontos 7 a 66: $s = 0.1$, terreno difusor

Em nenhum dos casos, para qualquer frequência considerada, se denotaram valores de p_s/p_d superiores a -10dB, de modo que não foi necessário proceder a qualquer alteração no projecto devido a este fenómeno.